



**Soraia Raquel  
Mendes Romão**

**Balanço sedimentar costeiro no troço litoral entre  
a praia da Barra e a praia de Mira**







**Soraia Raquel  
Mendes Romão**

## **Balanço sedimentar costeiro no troço litoral entre a praia da Barra e a praia de Mira**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica, realizada sob a orientação científica do Doutor Paulo Renato Enes Baganha Baptista, Membro Integrado do Centro de Estudo do Ambiente e do Mar (CESAM) da Universidade de Aveiro e da Doutora Cristina Maria de Almeida Bernardes, Professora Associada do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro.



Para a minha sobrinha,  
Flor



## **o júri**

presidente

**Doutor Jorge Manuel Pessoa Girão Medina**

Professor Auxiliar do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro

vogais

**Doutor Paulo Manuel Cruz Alves da Silva**

Professor Auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

**Doutor Paulo Renato Enes Baganha Baptista**

Investigador de Pós-Doutoramento, CESAM, Universidade de Aveiro



## agradecimentos / acknowledgements

A concretização desta dissertação e a conclusão de mais uma etapa na minha vida só foi possível com o apoio da família, amigos e professores. Assim, pretendo agradecer a todos os que me ajudaram e apoiaram nos momentos bons e menos bons e pela dedicação e paciência. Um agradecimento especial, Aos meus orientadores, Doutor Paulo Baptista e Professora Doutora Cristina Bernardes, pelos ensinamentos transmitidos, esclarecimentos, sugestões e críticas, ajuda e disponibilidade, porque sem eles seria impossível a realização deste trabalho.

À Administração do Porto de Aveiro pela disponibilização dos dados topobatimétricos de 2009 e 2012, ferramenta fundamental no cumprimento dos objectivos propostos.

À Agência Portuguesa do Ambiente pela disponibilização de informação relativamente a volumes sedimentares dragados no porto de Aveiro, informação que veio enriquecer o trabalho efectuado.

Aos Puertos del Estados (Espanha) agradeço a cedência dos dados simulados de agitação marítima, essenciais no estudo e na caracterização do clima de agitação marítima.

Ao Professor Telmo Cunha do Instituto de Telecomunicações que colaborou na tarefa de sincronização dos dados de agitação marítima simulados (Puertos del Estado) e medidos (Instituto Hidrográfico).

Aos meus pais por fazerem ser possível chegar onde cheguei, por todo o conforto e confiança transmitidos, por suportarem o meu mau humor e por compreenderem a minha ausência nos fins de semana. E ao meu irmão pelos momentos bem passados, numa pausa para o almoço.

Ao João, porque nenhum agradecimento será suficiente por tudo o que fizeste.

Por fim, à minha sobrinha, apesar de ainda não falar, todos os momentos passados com ela ajudaram a relaxar e a fazer uma “pausa” no trabalho.

A todos, um muito obrigada!





## Palavras-chave

balanço sedimentar, morfodinâmica, agitação marítima, litorais arenosos.

## Resumo

A costa Noroeste portuguesa caracteriza-se por uma elevada fragilidade geomorfológica, onde dominam os processos erosivos, associados à pressão antrópica sobre o litoral, ao clima de agitação marítima altamente energético e à diminuição do aporte sedimentar ao litoral. Estes aspectos tornam fundamental uma monitorização regular da zona costeira, com identificação dos locais mais sensíveis à erosão, e uma gestão do litoral mais eficiente. Neste estudo, pretendeu-se analisar a variabilidade morfológica da praia emersa e submersa, no troço litoral entre a Barra e a Praia de Mira (a sul do porto de Aveiro), a partir de modelos digitais do terreno e de balanços sedimentares e compreender o seu comportamento face a intervenções antrópicas ou ao clima de agitação marítima.

A metodologia implementada utilizou dados topográficos e batimétricos adquiridos em campanhas de monitorização realizadas entre 2003 e 2014 e dados topo-batimétricos cedidos pela Administração do Porto de Aveiro, S.A.. Na caracterização do clima de agitação marítima usaram-se dados da bóia ondógrafo de Leixões e dados simulados para um ponto próximo da bóia. A série simulada foi validada para preencher as lacunas existentes nos dados da bóia e, assim, obter uma série contínua de informação. O clima de agitação marítima observado caracteriza-se por ondulação de NW e alturas de onda significativa típicas entre 1 a 2 m (45 %). A ondulação em clima de temporal, ou seja, com alturas superiores a 4.34 m, é predominantemente de NW e WNW e ocorrem, em média, 15.30 eventos por ano.

A análise da variabilidade morfológica da praia emersa foi efectuada para duas escalas temporais, evolução ao longo da última década (2003 – 2013) e evolução recente (Outubro de 2013 a Abril de 2014). Na praia emersa observou-se que, para o período de Outubro de 2013 a Abril de 2014, a perda de  $0.93 \times 10^6 \text{ m}^3$  de sedimentos corresponde a cerca de 76 % do volume perdido no período entre 2003 e 2013, que foi de  $1.22 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Na análise da praia imersa registou-se a presença de barras submersas, não contínuas, com dimensões entre 0.60 e 2.60 m de altura e 125 a 230 m de largura e o crescimento das barras de desembocadura, junto ao canal de acesso à laguna de Aveiro, de 2009 para 2012. O balanço sedimentar para a praia submersa foi positivo nos sectores analisados. O estudo permitiu, ainda, obter uma caracterização mais detalhada do comportamento morfodinâmico da zona e da vulnerabilidade à acção de temporais e à presença de estruturas de protecção costeiras. Os dados obtidos podem ser considerados como um contributo para a gestão e ordenamento do litoral, tendo em conta que todo o troço é de exposição elevada a muito elevada aos processos que provocam erosão costeira.



## Keywords

sediment budget, morphodynamics, wave conditions, sandy shores.

## Abstract

The Portuguese northwest coast is characterized by high geomorphological fragility, where erosive processes dominate associated with the human pressure on the coast, the highly energetic wave climate and the reduced sediment supply to the coast. These aspects make fundamental a regular monitoring of the coastal zone aiming the identification of the most sensitive places to erosion, and a more efficient management of the coast. In this study, it was intended to analyse the morphological variability of sub-aerial and submersed beach, in the coastal section between Barra and Praia de Mira (South of Aveiro harbour inlet), from digital terrain models and sediment budgets with the goal of understand their behaviour regarding human intervention or wave climate.

The implemented methodology used topographic and bathymetric data acquired in monitoring campaigns carried out between 2003 and 2014 and top bathymetric data made available by Porto de Aveiro, SA. The wave climate characterization was done by using Leixões wave buoy data and a near Leixões point of wave simulated data. The simulated series was validated to fill the gaps in the float data and thus get a continuous series of information. The observed waves were characterized by NW swell and typical significant wave heights from 1-2 m (45 %). The swell during storms, characterized by heights higher than 4.34 m, is predominantly from NW and WNW, occurring, on average, 15.30 events per year.

The analysis of morphological variability of the sub-aerial beach was made for two time scales: last decade changes (2003 - 2013) and recent developments (October 2013 to April 2014). In the emersed beach was observed that, for the period between October 2013 to April 2014, the loss of  $0.93 \times 10^6 m^3$  of sediments correspond to near 76 % of the lost between 2003 and 2013, which was  $1.22 \times 10^6 m^3$ . The analysis of the submersed beach allow identify the presence of non-continuous submerged bars with 0.60 and 2.60 m high and 125-230 m of wide as well as it was allowed identify the growth of bars next to the Aveiro lagoon mouth, near the access channel during the period 2009 to 2012. The sediment budget for the submersed beach was positive in the analysed sectors. The study also enabled a more detailed characterization of the morphodynamic behaviour of the area and its vulnerability to the storms impact and to the presence of coastal protection structures. The obtained data can be considered as a contribution to the management and coastal planning, taking into account that the whole segment is of high to very high exposure to the processes that cause coastal erosion.



# Conteúdo

<b>Conteúdo</b>	<b>i</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>iii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>vii</b>
<b>Lista de Acrónimos</b>	<b>ix</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação e Objectivos . . . . .	2
1.2 Estado da Arte . . . . .	4
1.3 Estrutura da Dissertação . . . . .	5
<b>2 Enquadramento Teórico</b>	<b>7</b>
2.1 O Ambiente Litoral . . . . .	7
2.1.1 Praia . . . . .	8
2.2 Balanço Sedimentar Costeiro . . . . .	11
2.2.1 Fontes e Sumidouros de Sedimentos no Balanço Sedimentar . . . . .	12
<b>3 Caracterização e Evolução da Zona de Estudo</b>	<b>14</b>
3.1 Enquadramento Histórico . . . . .	14
3.2 Localização Geográfica . . . . .	17
3.3 Caracterização Geológica e Geomorfológica . . . . .	18
3.3.1 Dunas . . . . .	19
3.3.2 Praia . . . . .	20
3.4 Caracterização Climática . . . . .	21
3.4.1 Vento . . . . .	23
3.4.2 Outros Elementos do Clima . . . . .	24
3.5 Caracterização Oceanográfica . . . . .	25
3.5.1 Marés . . . . .	25
3.5.2 Clima de Agitação Marítima . . . . .	25
3.5.3 Temporais . . . . .	28
3.5.4 Deriva Litoral . . . . .	29
3.6 Intervenções Costeiras . . . . .	29
3.7 Evolução Recente da Linha de Costa . . . . .	33

<b>4</b>	<b>Dados e Métodos</b>	<b>35</b>
4.1	Dados . . . . .	35
4.1.1	Dados Topográficos . . . . .	35
4.1.2	Dados Topo-Batimétricos . . . . .	38
4.1.3	Dados de Agitação Marítima . . . . .	39
4.2	Validação dos dados topo-batimétricos . . . . .	39
4.3	Modelo Digital do Terreno . . . . .	40
4.4	Volumes . . . . .	43
4.5	Validação dos Dados de Agitação Marítima . . . . .	43
4.5.1	Análise Estatística . . . . .	45
4.5.2	Definição de Eventos de Temporal . . . . .	47
4.5.3	Correcção dos Dados Simulados . . . . .	50
<b>5</b>	<b>Resultados e Discussão</b>	<b>54</b>
5.1	Caracterização do Clima de Agitação Marítima . . . . .	54
5.1.1	Rumos Dominantes . . . . .	54
5.1.2	Alturas e Períodos de Onda . . . . .	56
5.1.3	Eventos de Temporal . . . . .	61
5.2	Variabilidade Morfológica . . . . .	65
5.2.1	Variabilidade Morfológica ao Longo da Última Década . . . . .	65
5.2.2	Variabilidade Morfológica Recente . . . . .	71
5.2.3	Balanco Sedimentar . . . . .	86
<b>6</b>	<b>Conclusão e Considerações Finais</b>	<b>95</b>
6.1	Conclusão . . . . .	95
6.2	Considerações Finais . . . . .	97
	<b>Bibliografia</b>	<b>99</b>
	<b>Anexos</b>	<b>I</b>

# Lista de Figuras

1.1	Mapa dos países da União Europeia com maior risco de erosão costeira (adaptado de EUrosion (2006)). À esquerda é apresentado o grau de exposição do sector costeiro Barra - Praia de Mira. . . . .	2
1.2	Destruição da estrada devido a galgamentos no Labrego a 3 de Novembro de 2011. . . . .	3
1.3	Destruição do passadiço na praia da Barra, Inverno 13-14. . . . .	3
2.1	Perfil da zona costeira e terminologia utilizada nesta dissertação (Dias, 2007). .	7
2.2	Perfil de praias dissipativas (a), intermédias (b) e reflectivas (c), utilizado para classificar a morfologia das praias. A classificação depende do declive da praia e das condições de agitação marítima (adaptado de Wright & Short (1984)). . .	9
2.3	Exemplos de morfologias presentes em praias arenosas: (a) Barras transversais rítmicas em S. Jacinto, Aveiro (extraído de Baptista (2006)) e (b) Sistema de crista - canal na praia do Areão, Mira. . . . .	10
2.4	Principais acidentes morfológicos ao longo do perfil da praia submersa (extraído de Ferreira (1993)). . . . .	11
2.5	Principais processos que contribuem para o balanço sedimentar (adaptado de Komar (1998)). . . . .	13
3.1	Fases de formação e evolução da laguna de Aveiro desde o séc. X (Adaptado de Gomes (1992) <i>in</i> Diogo (2004)). . . . .	14
3.2	Localização das diversas posições da flecha arenosa ao longo do litoral aveirense (Pereira, 2000). . . . .	15
3.3	Planta da barra de Aveiro em 1809 (adaptado de Loura (1984) <i>in</i> Boto (1997)).	16
3.4	Estado da barra do porto de Aveiro antes (1934) e após (1958) as obras de reconfiguração. . . . .	17
3.5	Localização geográfica da zona de estudo ( projecção UTM). . . . .	18
3.6	Enquadramento geológico da região em estudo (adaptado de Bettencourt & Ângelo (1992)). . . . .	19
3.7	Paliçadas sob diques arenosos (re)construídos após Inverno rigoroso 2013/2014 para reforço do cordão dunar. . . . .	20
3.8	Condições climáticas observadas para o índice da NAO (a) positivo e (b) negativo (Visbeck, 2014). . . . .	22



3.9	Índice da NAO para o Inverno (Dezembro a Março) de 1864 a 2014. O índice baseia-se na diferença normalizada da pressão à superfície do mar entre Lisboa, Portugal e Reykjavik, Islândia (Hurrell & National Center for Atmospheric Research Staff, 2014).	23
3.10	Média da frequência (%) do tipo de circulação no Inverno, Primavera, Verão e Outono (Lorenzo <i>et al.</i> , 2011).	24
3.11	Distribuição mensal de a) direcção de procedência da ondulação, b) altura de onda significativa e c) período de onda médio para os dados da bóia ondógrafo de Leixões (1993 a 2003) (Coelho, 2005).	27
3.12	Esquema da localização das estruturas de defesa costeira no sector Barra - Praia de Mira, onde E1 a E11 representam os esporões e MN e MS correspondem ao molhe Norte e ao molhe Sul do porto de Aveiro ( projecção UTM).	31
3.13	Taxa de erosão e acreção (m/ano) entre (a)1970 e 1998 (b)1998 e 2002 e (c)2002 e 2010. No eixo vertical estão representados os transeptos (Maia, 2012).	34
4.1	Sistema de GPS utilizado nas campanhas para aquisição de dados: (a) estação de referência e (b) veículo de todo-o-terreno com o sistema de aquisição instalado.	37
4.2	Estado da praia do Areão a barlamar do esporão, no dia 9 de Outubro de 2013.	38
4.3	Praia da Barra a 6 de Janeiro de 2014 durante a tempestade <i>Hercules</i> (cedida por <i>Tribo do Sol</i> ).	38
4.4	Estragos nas estruturas de protecção dunar após os temporais de Inverno de 2014 na praia da Barra (cedida por <i>Tribo do Sol</i> ).	38
4.5	Estado do mar a 28 de Fevereiro de 2014 a Sul da praia da Barra (cedida por <i>Tribo do Sol</i> ).	38
4.6	Gráfico da diferença de cotas entre as duas fontes de dados.	40
4.7	Processo de interpolação a partir de uma rede irregular de triângulos (Esri, 2012).	41
4.8	Aspecto dos dados topográficos inseridos no <i>ArcGis</i> : (a) grelha de pontos e (b) polígono delimitador da TIN.	42
4.9	Aspecto original da TIN (a) com o polígono delimitador sobreposto (contorno a preto) e (b) TIN depois de ser recortada.	42
4.10	Séries de dados medidos e simulados considerando informação comum a ambas as séries.	44
4.11	Rosa de rumos da direcção média de procedência da ondulação (DirM) (a) série obtida a partir dos dados da bóia ondógrafo e (b) série simulada.	44
4.12	Gráfico da altura significativa com os critérios de definição de temporal aplicados à série registada pela bóia de Leixões no mês de Janeiro de 2013.	49
4.13	Gráficos de dispersão dos dados medidos e simulados.	50
4.14	Rosa de rumos da direcção média de procedência da ondulação (DirM) para a (a) série medida e (b) série simulada corrigida.	51
5.1	Distribuição mensal da direcção média de procedência da ondulação.	55
5.2	Distribuição mensal da altura de onda significativa.	57
5.3	Distribuição mensal do período de onda médio.	58
5.4	Distribuição mensal do período de pico.	59

5.5	Rosa de rumos da direcção de ondulação correspondente a $H_s \geq H_{s(pico)}$ para cada período analisado: (a) Novembro de 2003 a Janeiro de 2008, (b) Janeiro de 2008 a Março de 2012, (c) Março de 2012 a Outubro de 2013, (d) Outubro de 2013 a Fevereiro de 2014 e (e) Fevereiro a Abril de 2014. . . . .	64
5.6	Evolução temporal da geomorfologia no sector CNV para o período de Novembro de 2003 a Janeiro de 2008. Para o mapa das diferenças valores superiores a 0 m (verdes e azuis) correspondem a acreção e os valores inferiores a 0 m (amarelos e vermelhos) a erosão. CN - Costa Nova e V - Vagueira correspondem às localidades. . . . .	67
5.7	Evolução temporal da geomorfologia no sector VA para o período Novembro de 2003 a Janeiro de 2008. Para o mapa das diferenças valores superiores a 0 m (verdes e azuis) correspondem a acreção e os valores inferiores a 0 m (amarelos e vermelhos) a erosão. L - Labrego e A - Areão correspondem às localidades. . .	68
5.8	Evolução temporal da geomorfologia no sector PCM para o período Novembro de 2003 a Janeiro de 2008. Para o mapa das diferenças valores superiores a 0 m (verdes e azuis) correspondem a acreção e os valores inferiores a 0 m (amarelos e vermelhos) a erosão. A - Areão e PC - Poço da Cruz correspondem às localidades. .	69
5.9	Evolução temporal da geomorfologia no sector PCM para o período Novembro de 2003 a Janeiro de 2008. Para o mapa das diferenças valores superiores a 0 m (verdes e azuis) correspondem a acreção e os valores inferiores a 0 m (amarelos e vermelhos) a erosão. PC - Poço da Cruz e M - Praia de Mira correspondem às localidades. . . . .	70
5.10	Evolução da praia do Areão: (a) antes e (b) depois da construção do esporão. .	71
5.11	Estado das praias após temporal de Janeiro de 2014: a) praia do Labrego (Sul da Vagueira) e b) praia do Poço da Cruz. . . . .	72
5.12	Evolução temporal da geomorfologia no sector BCN para o período Outubro de 2013 a Fevereiro de 2014. Para o mapa das diferenças valores superiores a 0 m (verdes e azuis) correspondem a acreção e os valores inferiores a 0 m (amarelos e vermelhos) a erosão. B - Barra e CN - Costa Nova correspondem às localidades. .	73
5.13	Arriba talhada junto ao enrocamento na praia da Vagueira Norte. . . . .	74
5.14	Evolução temporal da geomorfologia no sector CNV para o período Outubro de 2013 a Fevereiro de 2014. Para o mapa das diferenças valores superiores a 0 m (verdes e azuis) correspondem a acreção e os valores inferiores a 0 m (amarelos e vermelhos) a erosão. CN - Costa Nova e V - Vagueira correspondem às localidades. .	75
5.15	Evolução temporal da geomorfologia no sector VA para o período Outubro de 2013 a Fevereiro de 2014. Para o mapa das diferenças valores superiores a 0 m (verdes e azuis) correspondem a acreção e os valores inferiores a 0 m (amarelos e vermelhos) a erosão. L - Labrego e A - Areão correspondem às localidades. . .	76
5.16	Deposição de areia sobre o esporão e remobilização de rochas provenientes do esporão por acção da ondulação, na praia do Areão em Janeiro de 2014. . . . .	77
5.17	Evolução temporal da geomorfologia no sector APC para o período Outubro de 2013 a Fevereiro de 2014. Para o mapa das diferenças valores superiores a 0 m (verdes e azuis) correspondem a acreção e os valores inferiores a 0 m (amarelos e vermelhos) a erosão. A - Areão e PC - Poço da Cruz correspondem às localidades. . . . .	78

5.18	Evolução temporal da geomorfologia no sector PCM para o período Outubro de 2013 a Fevereiro de 2014. Para o mapa das diferenças valores superiores a 0 m (verdes e azuis) correspondem a acreção e os valores inferiores a 0 m (amarelos e vermelhos) a erosão. PC - Poço da Cruz e M - Praia de Mira correspondem às localidades. . . . .	79
5.19	Evolução temporal da topo-batimetria do sector BV para o período Setembro de 2009 a Outubro de 2012. Para o mapa das diferenças valores superiores a 0 m (amarelos e vermelhos) correspondem a acreção e os valores inferiores a 0 m (verdes e azuis) a erosão. Os perfis estão numerados de Norte para Sul. B - Barra, CN - Costa Nova e V - Vagueira correspondem às localidades. . . . .	81
5.20	Processos de transporte de sedimentos em frente à Barra, por influência da embocadura da laguna (Atkins, 2009). . . . .	82
5.21	Perfis batimétricos localizados a) a Sul da zona urbana da Barra e b) a Norte da zona urbana da Vagueira, obtidos a partir do segundo e do nono perfis que constituem a grelha de pontos, dos dados topo-batimétricos do sector BV. Para localização dos perfis ver Figura 5.19. . . . .	82
5.22	Evolução temporal da praia submersa dos sectores VA e PCM para o período Março de 2012 a Julho de 2013. Para o mapa das diferenças valores superiores a 0 m (amarelos e vermelhos) correspondem a acreção e os valores inferiores a 0 m (verdes e azuis) a erosão. L - Labrego, A - Areão, PC - Poço da Cruz e M - Praia de Mira correspondem às localidades. . . . .	84
5.23	Perfis batimétricos, localizados: a) a sotamar do esporão do Labrego, b) em frente ao esporão do Areão e c) a sotamar do esporão do Poço da Cruz; obtidos a partir dos perfis que constituem as grelhas de pontos, dos dados topo-batimétricos dos sectores VA e PCM. Para localização dos perfis ver Figura 5.22. . . . .	85
5.24	Variação de volumes absolutos ao longo do sector BCV para o período Outubro de 2013 - Fevereiro 2014. As barras amarelas indicam a localização de obras transversais (MS - Molhe Sul, E1 a E4 - Esporão nº1 ao Esporão nº4). . . . .	87
5.25	Variação de volumes absolutos ao longo do sector CNV para os vários períodos de análise. As barras amarelas indicam a localização de obras transversais (E5 - Esporão nº5). Deve-se ter em atenção a escala horizontal que não é a mesma para os três gráficos. . . . .	88
5.26	Variação de volumes absolutos ao longo do sector VA para os vários períodos de análise. As barras amarelas indicam a localização de obras transversais (E7 e E8 - Esporão nº7 e Esporão nº8). . . . .	89
5.27	Variação de volumes absolutos ao longo do sector APC para os vários períodos de análise. As barras amarelas indicam a localização de obras transversais (E8 e E9 - Esporão nº8 e Esporão nº9). Deve-se ter em atenção a escala horizontal que não é a mesma para os quatro gráficos. . . . .	90
5.28	Variação de volumes absolutos ao longo do sector PCM para os vários períodos de análise. As barras amarelas indicam a localização de obras transversais (E9 e E10 - Esporão nº9 e Esporão nº10). . . . .	91

# Lista de Tabelas

2.1	Ganho e perda de sedimentos em sistemas litorais (adaptado de NOAA (2014)).	12
3.1	Dragagem de inertes no porto de Aveiro (informação cedida pela APA)	32
3.2	Taxas médias de variação da linha de costa em m/ano (adaptado de Ferreira (1993))	33
4.1	Dados topográficos utilizados.	36
4.2	Cotas registadas para cada conjunto de dados, sendo APA os dados topobatimétricos e UA os dados topográficos, e a diferença de cotas entre os dois conjuntos.	40
4.3	Resultados estatísticos entre os dados medidos e simulados.	46
4.4	Análise estatística para validação de dados simulados com dados medidos por bóias.	46
4.5	Número de eventos de temporal observados no período em análise, para a série medida na bóia de Leixões.	48
4.6	Número de registos em eventos de temporal no período em análise, para a série medida na bóia de Leixões.	48
4.7	Resultados estatísticos para registos médios, $H_s < H_{s_{pico}}$ , onde $n$ corresponde a 33466 pontos.	49
4.8	Resultados estatísticos para registos de temporal, $H_s \geq H_{s_{pico}}$ , onde $n$ corresponde a 1647 pontos.	49
4.9	Resultados estatísticos entre os dados medidos e os dados simulados corrigidos.	51
4.10	Número de eventos de temporal observados nos diferentes meses do período em análise, para a série simulada.	52
4.11	Número de registos em eventos de temporal no período em análise, para a série simulada.	53
5.1	Número de registos e frequência de ocorrência por rumos, para a direcção média de procedência da ondulação.	55
5.2	Número de registos e frequência de ocorrência por classes, para a altura significativa ( $H_s$ ).	56
5.3	Número de registos e frequência de ocorrência por classes, para o período médio ( $T_m$ ).	57
5.4	Número de registos e frequência de ocorrência por classes, para o período de pico ( $T_p$ ).	58
5.5	Número de registos por alturas de onda significativa e respectivos períodos médios.	59
5.6	Número de registos por rumos e respectivas alturas de onda significativa.	60

5.7	Número de registos por rumos e respectivos períodos médios. . . . .	61
5.8	Número de eventos de temporal observados nos diferentes meses do período em análise. . . . .	62
5.9	Número de registos em eventos de temporal observados nos diferentes meses do período em análise. . . . .	62
5.10	Análise dos eventos de temporal pelos intervalos temporais dos dados topográficos.	63
5.11	Balanço sedimentar para cada sector e para cada intervalo analisado ( $\times 10^4 m^3$ ).	92
5.12	Balanço sedimentar da praia emersa e da praia submersa para cada sector e diferentes anos. . . . .	93

# Lista de Acrónimos

**APA** Agência Portuguesa do Ambiente

**APA, S.A.** Administração do Porto de Aveiro, S.A.

**APC** Areão - Poço da Cruz

**B** *Bias*

**BCN** Barra - Costa Nova

**BV** Barra - Vagueira

**CNV** Costa Nova - Vagueira

**DEM** *Digital Elevation Model*

**DirM** direcção média de procedência da ondulação

**E** Este

**EIA** Estudo de Impacte Ambiental

**GIZC** Gestão Integrada Para as Zonas Costeiras

**HIRLAM** *High Resolution Limited Area Model*

$H_s$  altura significativa

**INSHORE** *INtegrated System fo High Operational REsolution*

**IPMA** Instituto Português do Mar e da Atmosfera

**MDT** Modelo Digital de Terreno

**N** Norte

**NE** Nordeste

**nmm** nível médio do mar

**NNE** Norte Nordeste

**NNW** Norte Noroeste

**NW** Noroeste

**PCM** Poço da Cruz - Praia de Mira

**RMS** *Root Mean Square*

**S** Sul

**SE** Sudeste

**SIG** Sistemas de Informação Geográfica

**SSW** Sul Sudoeste

**SW** Sudoeste

**SWAN** *Simulating Waves Nearshore*

**TIN** *Triangulated Irregular Network*

$T_m$  período médio

$T_p$  período de pico

**VA** Vagueira - Areão

**W** Oeste

**WAM** *Watershed Assessment Model*

**WNW** Oeste Noroeste

**WSW** Oeste Sudoeste

$\bar{X}$  Média

**Z.H.** zero hidrográfico

$\sigma$  Desvio padrão

# Capítulo 1

## Introdução

A zona costeira corresponde à porção de território influenciada directa e indirectamente em termos biofísicos pelo mar e que pode ter para o lado de terra largura tipicamente da ordem quilométrica (GIZC, 2007).

As zonas costeiras têm sido um importante foco no desenvolvimento da sociedade humana. A utilização do mar para o transporte e o comércio e a abundância de alimentos nas águas costeiras levou à fixação de pessoas. As zonas costeiras continuam a ser áreas de elevado potencial para a sociedade moderna, desempenhando funções relacionadas com a criação de postos de trabalho, crescimento económico e qualidade de vida. Contudo, a dinâmica e complexidade dos processos costeiros influenciam a capacidade de manter as actividades humanas nestas áreas (Comissão Europeia - CE, 1999). A pressão urbana excessiva sobre estes ambientes transformou um fenómeno natural de erosão num problema que se vai tornando cada vez maior (EUrosion, 2006).

Portugal é um país com uma vasta extensão de zona costeira, e é considerado o quarto dos dezoito países da União Europeia que mais sofrem, na actualidade, graves problemas de erosão costeira (Comissão Europeia - CE, 1999) (Figura 1.1). Os processos erosivos que se têm manifestado em diversos trechos da costa portuguesa constituem um exemplo notório e preocupante da dinâmica das zonas costeiras.

A costa noroeste portuguesa, onde se insere a zona de estudo, caracteriza-se por apresentar uma elevada fragilidade geológica, constituída por sistemas dunares, com cotas baixas e por estruturas geológicas de origem sedimentar, igualmente, sensíveis. Esta fragilidade geológica associada à pressão antrópica sobre o litoral, a um clima de agitação marítima altamente energético e a uma diminuição da adução de sedimentos à costa, origina um processo erosivo de grande intensidade (POOC, 2000). Toda a costa noroeste portuguesa encontra-se em situação de erosão costeira. Contudo, existem troços cuja a situação é mais grave que outros, sendo o troço costeiro entre as praias da Barra e a Praia de Mira, um dos mais afectados (mapa da esquerda da Figura 1.1).



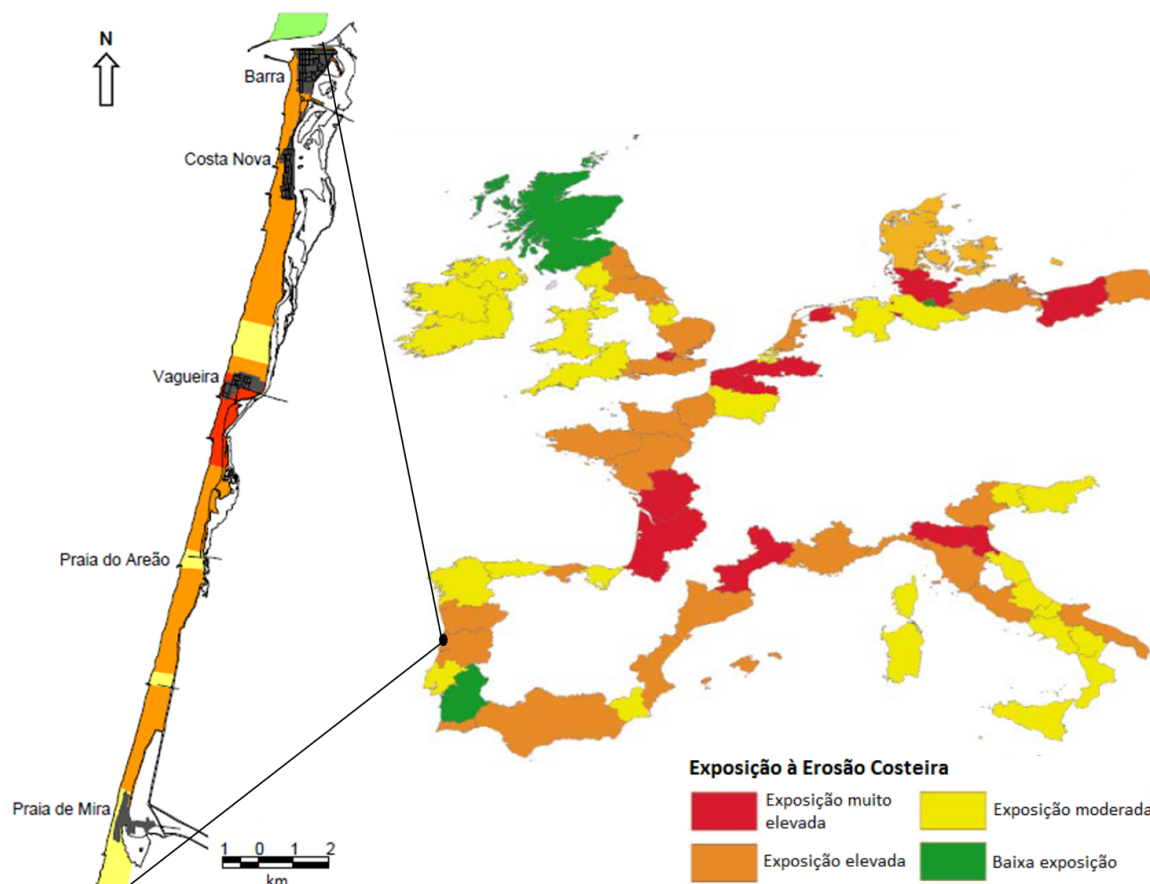


Figura 1.1: Mapa dos países da União Europeia com maior risco de erosão costeira (adaptado de EUrosion (2006)). À esquerda é apresentado o grau de exposição do sector costeiro Barra - Praia de Mira.

## 1.1 Motivação e Objectivos

No troço em estudo neste trabalho, os fenómenos de erosão costeira têm-se vindo agravar desde a década de 70 devido, sobretudo, à retenção nos molhes de acesso ao porto de Aveiro, dos sedimentos transportados na deriva litoral e da extracção de areias das praias. Ao longo dos anos tem-se feito sentir o acentuado recuo da linha de costa, havendo notícias frequentes de galgamentos e destruição de bens e serviços com a ocorrência de eventos de temporal. Por exemplo, em 2011, o mar galgou a duna e danificou a estrada junto ao Labrego (a Sul da Vagueira), unindo-se, temporariamente, à laguna (Figura 1.2):

«A Costa Portuguesa foi hoje atingida por ondas entre os 6 e os 9 metros, em vários pontos do país há registo de praias ameaçadas e a Sul de Aveiro, na Vagueira, o mar voltou a destruir as dunas pela segunda vez no espaço de uma semana. A força das águas destruiu uma estrada e abriu um canal entre o mar e ria.» (notícia de 03 de Novembro de 2011, *in* rtp.pt)



Figura 1.2: Destruição da estrada devido a galgamentos no Labrego a 3 de Novembro de 2011.

No Inverno de 2013-14, toda a costa foi atingida por vários temporais que deixaram marcas na sua passagem (Figura 1.3):

«A fúria do mar continua a fazer estragos um pouco por todo o país. Na praia da Barra em Aveiro, os comerciantes têm sido surpreendidos pela força das ondas, que já causou inúmeros prejuízos. Até o passadiço, que atravessava o areal, e que foi inaugurado há menos de um ano, desabou parcialmente.» (notícia de 05 de Fevereiro de 2014, *in* portocanal.sapo.pt)



Figura 1.3: Destruição do passadiço na praia da Barra, Inverno 13-14.

A elevada pressão demográfica sobre este trecho levou a uma artificialização do litoral e a profundas alterações na dinâmica costeira. Por estes motivos é necessário uma monitorização regular desta zona e compreender o impacto das intervenções humanas e, também, de fenómenos naturais sobre o sistema costeiro.

No âmbito dos problemas que afectam o sector litoral entre a Barra e a Praia de Mira procurou-se compreender melhor o comportamento desta zona através de uma abordagem ainda pouco aplicada. Nesse sentido, a realização desta dissertação pretende a identificação dos locais mais sensíveis a erosão, bem como, contribuir para propósitos de gestão litoral mais eficientes.

Os objectivos principais deste trabalho englobam:

- Caracterizar morfologicamente a praia emersa e submersa e os balanços sedimentares;
  - Estudar a variabilidade morfológica para duas escalas temporais: a evolução ao longo da última década (de 2003 a 2013) e evolução recente (Outubro de 2013 a Abril de 2014);

- Relacionar com eventuais impactos de intervenções actualmente em curso e implicações ao nível de gestão litoral;

- Caracterizar o clima de agitação marítima para o período de análise.

Como objectivos secundários pretende-se:

- Realizar Modelos Digitais de Terreno com os dados topográficos e topo-batimétricos obtidos em campanhas de observação;
- Calcular volumes sedimentares para sectores previamente definidos;
- Validar uma série temporal simulada de dados de agitação marítima para preencher as lacunas presentes numa série registada pela bóia ondógrafo de Leixões.

## 1.2 Estado da Arte

O balanço sedimentar envolve as contribuições e as perdas sedimentares num sector costeiro. Este é utilizado para quantificar os fenómenos erosivos, as taxas de transporte litoral e compreender os processos costeiros (Rosati, 2005; Bowen & Inman, 1966). Por estes motivos, este parâmetro é aplicado cada vez mais em estudos de litorais em diversos tipos de costas (Limber *et al.*, 2008).

Em Portugal, a aplicação deste método é, ainda, incipiente, tendo sido utilizado por Correia *et al.* (1997) na costa algarvia, no sector costeiro Quarteira – Vale do Lobo. Os autores determinaram o volume anual retido na praia, proveniente da erosão das arribas, da ordem de  $36.40 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{ano}$ . Loureiro (2007) aplicou-o nas praias do conselho de Esposende, observando uma tendência erosiva nos diferentes tipos de costa, sendo esta superior para praias arenosas ( $685 \text{ m}^3/\text{m}/\text{ano}$ ). Capelo (2012) quantificou o balanço de massa condicionado pela implantação do quebramar destacado da praia da Aguda, Vila Nova de Gaia, concluindo que este foi positivo para o período analisado (2001 a 2011).

Para a zona de estudo são poucos os trabalhos sobre balanço sedimentar, sendo de salientar os de Ferreira (1993) e de Baptista *et al.* (2014). Ferreira (1993) quantificou perdas de sedimentos em pelo menos  $0.10 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$  para a plataforma por acção da subida relativa do nível do mar, de  $0.90 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$  através da deriva litoral para Sul e entre  $0.06\text{-}0.12 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$  devido ao vento. Para além dos processos naturais, os molhes que protegem a entrada à laguna de Aveiro retêm mais de  $0.70 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$  e o banco arenoso externo, formado na dependência do canal de ligação, cerca de  $0.20 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ . Baptista *et al.* (2014) determinaram taxas de transporte de sedimentos entre o Poço da Cruz e a Praia de Mira para o período de 2003 a 2008, obtendo valores médios de  $532 \times 10^3$  a  $1195 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{ano}$ .

O litoral aveirense é caracterizado por um extensa área arenosa e plana, muito dinâmica e ambientalmente frágil, sob um regime mesomareal (Ferreira & Dias, 1992). A faixa litoral tem sofrido significativas variações ao longo do último século, cuja manifestação mais evidente foi a modificação da evolução da linha de costa, através de um acelerado processo de erosão (Ferreira, 1993). Bernardes & Baptista (2011) apresentam uma cartografia evolutiva da barreira nos últimos 52 anos para o sector Barra - Praia de Mira. A análise dos dados permitiu quantificar a forte erosão que a barreira tem sofrido nas últimas décadas.

Devido ao fenómeno de erosão costeira, têm sido vários os trabalhos realizados nesta zona. No âmbito desta temática são de salientar os trabalhos de Boto (1997), Pereira (2000), Caetano

(2002) e Diogo (2004), estes autores estudaram a evolução da linha de costa, para diferentes sectores, entre a Barra e a Praia de Mira. Os quatro autores reforçaram a existência dos fenómenos erosivos que afectam este troço litoral. Num estudo mais recente, Maia (2012) identificou recuos da linha de costa, para o sector Vagueira - Praia de Mira de aproximadamente 2 m/ano, sendo a taxa de erosão máxima registada de 6 m/ano a Norte da Vagueira e de 4 m/ano na praia do Labrego, para o período de 1958 a 2010.

O estudo da morfodinâmica das praias e os mecanismos forçadores associados permitem estabelecer formas de previsão do comportamento evolutivo das áreas costeiras. As principais variações morfológicas ocorrem no decurso de temporais (Ferreira, 1998). Eventos de forte agitação marítima e de grande sobre-elevação meteorológica (*storm surge*) têm um forte impacto nas zonas costeiras expostas, como é o caso da zona estudo (Ferreira, 2005). Ferreira & Dias (1997) avaliaram a influência de temporais na caracterização da variabilidade morfológica para o sector Aveiro - Cabo Mondego. Neste estudo verificou-se que as praias localizadas a sotamar de esporões são muito mais frágeis que as restantes, estando mais sujeitas à erosão. Salientam a importância da monitorização das praias de forma a aumentar o conhecimento e de se prever o seu comportamento futuro, nomeadamente, no que respeita à erosão associada a temporais.

Segundo Veloso Gomes *et al.* (2004), não há soluções absolutas para os problemas de erosão costeira que afectam a costa Noroeste portuguesa dada a dinâmica da linha de costa e as presentes condições do desenvolvimento humano. Contudo, é essencial tentar mitigar os processos de erosão costeira ou pensar em definir uma nova linha de defesa (Reis, 2010).

Além dos trabalhos desenvolvidos existem programas que visam gerir a faixa costeira, nomeadamente, o Polis, o POOC e o EUrosion:

**Polis Litoral** - Operações Integradas de Requalificação e Valorização da Orla Costeira. Este programa está dividido em quatro áreas: Polis Litoral Norte, Polis Litoral Ria de Aveiro, Polis Litoral Sudoeste e Polis Litoral Ria Formosa. A zona de estudo é abrangida pelo programa Polis Litoral Ria de Aveiro que incide sobre a frente costeira e a frente de ria dos municípios de Águeda, Albergaria-a-Velha, Aveiro, Estarreja, Ílhavo, Mira, Murtosa, Oliveira do Bairro, Ovar, Sever do Vouga e Vagos (Polis, 2008).

**POOC** - O Plano de Ordenamento da Orla Costeira de Ovar - Marinha Grande destina-se a conciliar os diversos valores em presença neste sector da orla costeira, visando valorizar, diversificar e garantir os usos e as funções da orla costeira; proteger os ecossistemas naturais e assegurar a exploração sustentável dos recursos; melhorar as condições de vida das populações; reforçar e melhorar as infra-estruturas e equipamentos e promover uma oferta turística de qualidade; valorizar o tipo de povoamento em respeito pelas dinâmicas costeiras, pelos valores naturais e pela minimização de riscos; e promover a articulação dos factores económicos e sociais (POOC, 2000).

**EUROSION** - este estudo de casos foi elaborado no sentido de qualificar o estado, impacte e tendências de erosão na Europa e avaliar as acções necessárias. O EUROSION concluiu que devem ser feitos esforços para melhorar a resiliência das zonas costeiras através da melhoria da gestão dos sedimentos e da reserva de espaço suficiente para a ocorrência dos processos costeiros (EUrosion, 2006).

### 1.3 Estrutura da Dissertação

O presente estudo encontra-se organizado em seis capítulos, uma listagem das referências bibliográficas e anexos. Os três primeiros capítulos enquadram-se num contexto mais teórico, baseados na pesquisa bibliográfica realizada, os capítulos 4 e 5 envolvem o trabalho prático desenvolvido, enquanto o capítulo 6 apresenta as conclusões.

- No primeiro capítulo faz-se referência à motivação e objectivos que levaram à concretização deste trabalho; efectua-se, também, uma análise dos estudos realizados sobre os temas tratados durante esta dissertação e, em especial, à zona de estudo;
- O capítulo 2 inclui uma introdução teórica sobre os aspectos base deste trabalho, definindo alguns conceitos relativos às morfologias presentes em litorais arenosos e sobre balanços sedimentares;
- O capítulo 3 inicia-se com um enquadramento sobre a evolução da costa ocidental portuguesa e faz uma caracterização da zona de estudo tendo em conta aspectos como a geomorfologia, agitação marítima, evolução da linha de costa e intervenções realizadas;
- O capítulo 4 descreve a proveniência dos dados utilizados e a metodologia adoptada, dividida no tratamento dos dados das campanhas de campo e na validação dos dados de agitação marítima;
- O capítulo 5 apresenta os resultados, análise e discussão dos mesmos. Inicialmente, caracteriza-se o clima de agitação para o período de estudo, seguido da evolução temporal do troço litoral.
- Por fim, no capítulo 6 são sumariadas as conclusões, algumas considerações e possíveis trabalhos futuros.

## Capítulo 2

# Enquadramento Teórico

Este capítulo está dividido em duas partes: na primeira é feita a apresentação de alguns conceitos relativos às morfologias presentes em litorais arenosos e a sua variação temporal e espacial; na segunda parte faz-se uma abordagem sobre o balanço sedimentar costeiro e os principais créditos e débitos que o condicionam.

### 2.1 O Ambiente Litoral

Em ambientes litorais, e mais especificamente em litorais arenosos, estão presentes inúmeras morfologias que são importantes na caracterização destes meios. Alguns dos termos são, ocasionalmente, sujeitos a uma interpretação errada, uma vez que adoptam diferentes significados, dependendo da área disciplinar em que são aplicados. A Figura 2.1 ilustra as principais terminologias adoptadas para a classificação das morfologias presentes na praia e os limites considerados, que serão definidos a seguir.

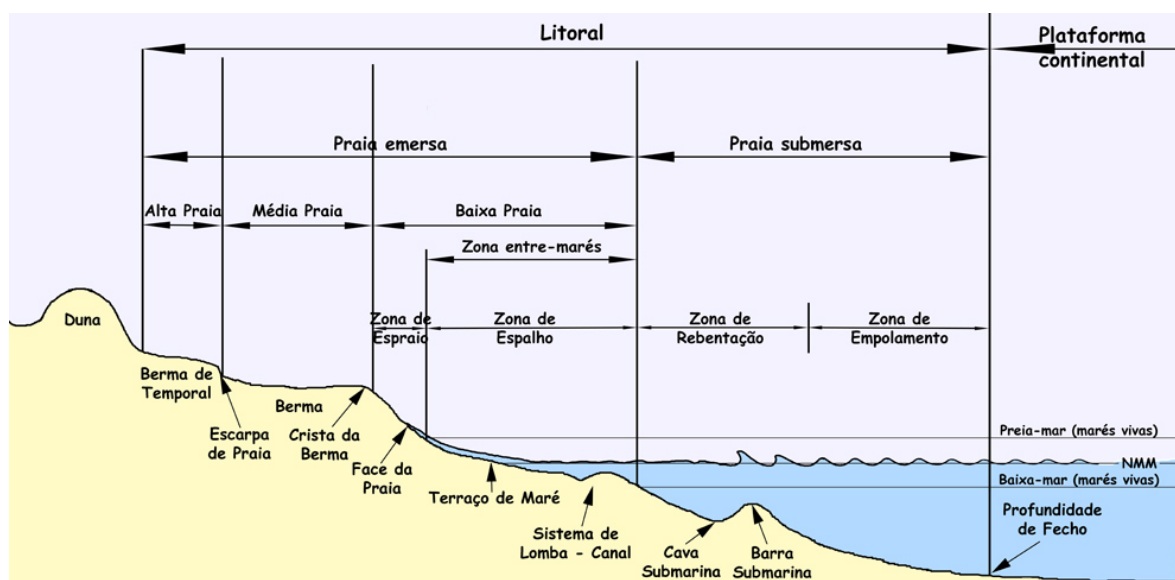


Figura 2.1: Perfil da zona costeira e terminologia utilizada nesta dissertação (Dias, 2007).

Entende-se por litoral a faixa de território onde os sedimentos podem ser transportados

pela acção das ondas e do vento. O limite marítimo é definido pela profundidade de fecho e o terrestre é o limite da acção das ondas (Davidson-Arnott, 2010). Outro termo importante é o da linha de costa. Esta corresponde à fronteira entre a "terra e o mar" e pode ser materializada pela intercepção do cordão dunar frontal e a praia. No caso de uma costa não artificializada, quando se pretende quantificar a evolução da linha de costa pode usar-se, como referência, a base da duna frontal ou da arriba talhada na duna (Baptista, 2006).

### 2.1.1 Praia

O conceito de praia é aplicado à acumulação de sedimentos não consolidados periférica a um corpo hídrico, formada pela acumulação conjunta das ondas e correntes. A granulometria dos sedimentos é variável entre a areia e o cascalho. A praia é constituída por duas partes interdependentes: a praia emersa e a praia submersa (Dias, 2007). O limite entre a praia emersa e a praia submersa pode ser definido pelo nível da maré baixa de marés vivas (Ferreira, 1993).

#### Praia Emersa

A praia emersa é considerada a faixa compreendida entre o contacto da duna frontal, ou a arriba talhada na duna frontal, e o nível da baixa-mar de maré viva. A configuração do perfil da praia emersa varia entre dois extremos, a qual é dependente das condições de agitação marítima e reflecte o grau energético da mesma (Ferreira, 1993) (Figura 2.2).

No perfil dissipativo, típico do Inverno marítimo, as condições de agitação marítima são bastante energéticas, provocando alterações profundas na morfologia da praia, devido à erosão dos sedimentos da praia emersa e posterior transporte para a praia submersa, formando barras arenosas (Figura 2.2a). Nestas condições, a praia adquire um declive mais suave e uma forma côncava, desprovida de bermas e em que o espraio das ondas, no caso da praia ser muito estreita, pode atingir a base das dunas e/ou talhar arribas.

O perfil reflectivo, característico do Verão, forma-se devido a condições de agitação marítima pouco energéticas (Figura 2.2c). Durante períodos de ondulação de pequena amplitude e de curto período, os sedimentos são transportados da praia submersa para a praia emersa, tornando a praia mais alta e larga. As praias reflectivas caracterizam-se por apresentar uma zona de espalho relativamente estreita, assumindo um perfil que permite reflectir a energia das ondas.

Segundo Ferreira (1998), num perfil reflectivo, podem diferenciar-se três zonas que nem sempre estão presentes ao mesmo tempo (Ferreira, 1998; Komar, 1998; Baptista, 2006) (Figura 2.1):

- **Alta praia:** diz respeito à faixa entre o contacto da praia com o limite continental, que pode ser uma duna, arriba ou enrocamento e o início da berma. É uma superfície aplanada e inclinada em direcção ao mar, ocorrendo, eventualmente, dunas embrionárias ou antedunas. Na ausência desta faixa o contacto praia emersa – duna é realizado pela média praia ou pela baixa praia.
- **Média praia:** zona intermédia da praia emersa, constituída por uma ou mais bermas, horizontais a subhorizontais, ou ligeiramente inclinadas para terra. A separação das bermas (quando há mais do que uma) é feita por pequenas rupturas de pendor. A crista da berma mais externa estabelece o limite, para o mar, da praia média.

- **Baixa praia:** corresponde à faixa situada entre a crista da berma mais externa e o nível de baixa-mar em maré viva. A baixa praia inclui a face da praia, zona inclinada onde actuam as ondas durante o ciclo de maré. Em praias com carência sedimentar ou numa fase pós-temporal não há média ou alta praia, existindo apenas a baixa praia.

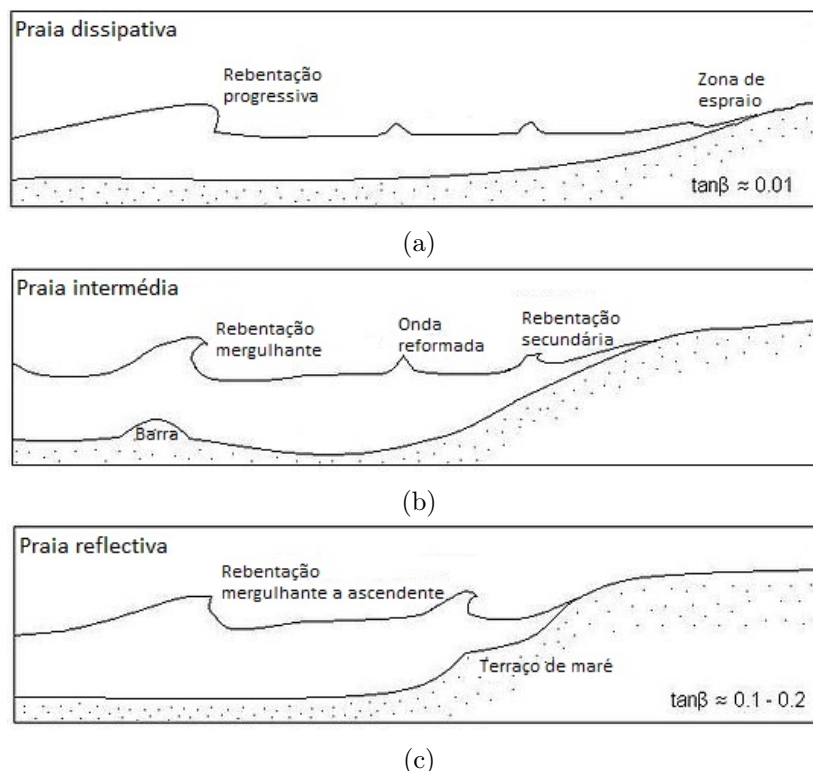


Figura 2.2: Perfil de praias dissipativas (a), intermédias (b) e reflectivas (c), utilizado para classificar a morfologia das praias. A classificação depende do declive da praia e das condições de agitação marítima (adaptado de Wright & Short (1984)).

O perfil intermédio apresenta características de ambos os extremos, dissipativo e reflectivo (Figura 2.2b). A morfologia da praia vai variando gradualmente de acordo com as condições hidrodinâmicas. Além das variações ao longo do perfil transversal da praia e das variações longilitorais de grande escala, existem outras formas características que contribuem para a modificação da morfologia e sua variabilidade (Ferreira, 1993). Dentro destas formas podem ser observadas na praia emersa as cúspides, que conferem um aspecto rendilhado à face da praia. Estas são morfologias rítmicas típicas de algumas praias, caracterizada pela existência de elevações transversais de areia, regularmente espaçadas, alternando com depressões, ficando a praia com aspecto ondulado (Dias, 2007). As barras transversais rítmicas são outras formas rítmicas de grande amplitude (Ferreira, 1993), geradas pela sucessão rítmica de correntes de fuga e barras transversais, normalmente visíveis na baixa praia (Baptista, 2006) (Figura 2.3a).

Outra morfologia que se pode observar são os sistemas crista - canal, caracterizados pela existência de uma pequena elevação e de uma pequena depressão, dispostos longilitoralmente, e que ocorre na zona entre marés (Figura 2.3b). As lombas são cortadas por aberturas, por onde a água sai das cavas para o mar quando o nível da maré vazante se torna inferior ao da



morfologia, e por onde a água do espraio da onda entra na maré enchente. Numa última fase, os sistemas de crista - canal acabam por encostar à praia emersa, formando bermas de praia (Dias, 2007).



(a) Barras transversais rítmicas



(b) Sistemas de crista - canal

Figura 2.3: Exemplos de morfologias presentes em praias arenosas: (a) Barras transversais rítmicas em S. Jacinto, Aveiro (extraído de Baptista (2006)) e (b) Sistema de crista - canal na praia do Areão, Mira.

### Praia Submersa

O domínio submerso estende-se até à profundidade onde, devido à influência das ondas e das marés, deixa de haver transporte sedimentar e alterações morfológicas apreciáveis, numa escala temporal definida, designada por profundidade de fecho. Este parâmetro depende das condições de agitação e da escala temporal, o que irá influenciar a largura da praia submersa (Ferreira, 1998).

Birkemeier (1985), a partir de medições realizadas em perfis de praia obteve a seguinte equação para a profundidade de fecho,  $h_c$ :

$$h_c = 1.75H_s - 57.9 \left( \frac{H_s^2}{gT_{H_s}^2} \right) \quad (2.1)$$

Onde,  $H_s$  corresponde à altura significativa da onda, que corresponde a um terço da média das alturas mais elevadas, e  $T_{H_s}$  é o período da onda determinado a partir da média dos períodos das ondas utilizadas no cálculo da altura significativa e  $g$  a aceleração da gravidade.

Na Figura 2.4 está representado o perfil da praia submersa, o qual é menos acidentado que o da praia emersa, caracterizado por um relevo suave e, geralmente, convexo que se prolonga até à profundidade de fecho (Komar, 1998). A praia submersa é uma zona muito complexa e onde se faz sentir a deriva litoral e, conseqüentemente, intensas movimentações de sedimentos, quer longitudinal, quer transversalmente à linha de costa (Dias *et al.*, 1994). As formas mais expressivas no perfil da praia submersa são as barras submarinas, em geral paralelas à costa, formadas por sedimentos oriundos da praia emersa em condições de agitação mais energéticas e que retornam à praia em condições menos energéticas. As depressões que se desenvolvem

ao longo da costa em associação com as barras são as cavas submersas. O número de cavas presentes num perfil de praia é igual ao número de barras.

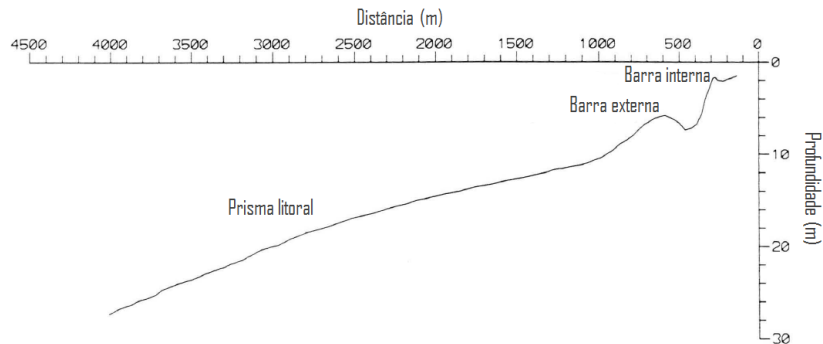


Figura 2.4: Principais acidentes morfológicos ao longo do perfil da praia submersa (extraído de Ferreira (1993)).

Quanto à hidrodinâmica, a interação da ondulação com a morfologia do fundo define várias zonas com início na praia submersa que se prolongam até à baixa praia, podendo distinguir-se quatro zonas (Ferreira, 1998; Baptista, 2006):

- **Zona de empolamento:** localiza-se entre a profundidade de fecho e a zona de rebentação, que devido a variações de declive do fundo dá-se o empolamento da onda.
- **Zona de rebentação:** local onde ocorre a rebentação da onda, normalmente, associada à presença de barras submarinas e à diminuição da profundidade.
- **Zona de espalho:** zona limitada pela dissipação de energia da onda, após a rebentação. Em praias planas e de baixo declive, as ondas rebentam e voltam a formar-se, com menor altura, sofrendo novamente empolamento e rebentação na barra mais interna ou directamente na face da praia.
- **Zona de espraio:** é uma zona relativamente restrita, delimitada pelo máximo e mínimo percurso da onda, sobre a face da praia após rebentação.

É na zona de espraio que a energia das ondas causa maior efeito, provocando variações do nível da água em poucos segundos. São os processos hidrodinâmicos os principais responsáveis pelas alterações morfológicas que se observam no perfil de praia.

## 2.2 Balanço Sedimentar Costeiro

Os litorais arenosos constituem um dos ambientes mais dinâmicos e frágeis da zona costeira. Um dos problemas que, actualmente, mais afecta estes sistemas é a erosão. A erosão costeira ocorre sempre que o mar avança sobre terra e mede-se em termos de taxa de erosão média ao longo de um período suficientemente longo, de forma a eliminar a influência do estado do tempo, de tempestades e dos movimentos locais de transporte sedimentar. Resulta da combinação de factores, naturais e antrópicos, que operam a diferentes escalas (EUrosion, 2006).

Uma forma de quantificar a erosão costeira é a relação entre a quantidade de sedimentos que entra e a quantidade de sedimentos que sai de um mesmo sistema através do balanço sedimentar. Os processos erosivos ocorrem quando a quantidade de sedimentos que sai do sistema é superior à quantidade que entra, gerando um balanço sedimentar negativo; na situação contrária verifica-se um balanço sedimentar positivo. Este método aplica a lei da conservação da massa para os sedimentos costeiros, sendo definido pela seguinte equação:

$$\sum Q_{fontes} - \sum Q_{sumidouros} - \Delta V + P - R = Residual \quad (2.2)$$

Onde  $Q_{Fontes}$  e  $Q_{Sumidouros}$  são as fontes e sumidouros que controlam o volume, respectivamente,  $\Delta V$  é a variação líquida em volume dentro da célula,  $P$  e  $R$  são a quantidade de material colocado e retirado da célula, respectivamente, e *Residual* representa o grau de balanço da célula (Rosati, 2005).

### 2.2.1 Fontes e Sumidouros de Sedimentos no Balanço Sedimentar

O balanço sedimentar é composto por três elementos principais:

- Fontes - qualquer processo que contribua com sedimentos para a costa;
- Sumidouros - processos que erodem sedimentos da zona litoral;
- Processos convectivos ou de transporte que redistribuem os sedimentos.

Os contributos sedimentares para a praia resultam, geralmente, dos materiais sólidos transportados pelos rios, pela deriva litoral e através da erosão das arribas. A erosão ou perda de sedimentos da praia está relacionada com o transporte de sedimentos para a plataforma continental, pelo transporte para sotamar causado pela deriva litoral e pelo transporte de sedimentos mais finos realizado pelo vento, propiciando a formação de dunas (Komar, 1998) (Figura 2.5). Sazonalmente, também ocorrem perdas e ganhos pelo transporte sedimentar para o largo e para a praia, associados à acção energética das ondas, determinando o perfil de praia (Komar, 1998). A Tabela 2.1 lista algumas das fontes e sumidouros que contribuem para o balanço sedimentar.

Tabela 2.1: Ganho e perda de sedimentos em sistemas litorais (adaptado de NOAA (2014)).

Ganhos	Perdas	Balanço
- Transporte longitudinal para a praia	- Transporte longitudinal para fora da zona litoral	Acreção ou erosão das praias (ganho ou perda de sedimentos)
- Transporte fluvial	- Transporte para o largo	
- Erosão de falésias	- Transporte do vento de terra	
- Transporte do vento para a praia	- Transporte através de canhões submarinos	
- Alimentação artificial das praias	- Exploração de inertes (sedimentos)	
	- Outras causas antropogénicas	

A diminuição do fornecimento sedimentar à orla costeira tem-se acentuado nos últimos anos. As principais fontes abastecedoras (plataforma continental e contributo fluvial) não conseguem repor o volume sedimentar que se perde para as zonas mais profundas da plataforma continental e ou que é utilizado para as actividades antrópicas. Associado às actividades antrópicas, está (Veloso Gomes, 2010):

- a intensificação da ocupação humana no litoral, que leva à construção de edifícios e arruamentos sobre dunas, praias, arribas e faixas dinâmicas;
- o enfraquecimento de fontes aluvionares devido a alterações nas bacias hidrográficas, albufeiras e barragens, extracção de areias nos rios e estuários e dragagens nos canais de navegação;
- a construção de quebramares portuários e canais de navegação;
- a implantação de obras aderentes e quebramares destacados;
- a destruição e fragilização de dunas através de terraplanagens, pisoteio, acessos às praias, parques de estacionamento e veículos motorizados.

Como causas naturais deve-se assinalar a intensificação dos temporais que removem os sedimentos das praias e os levam para as zonas mais profundas da plataforma continental. A ocorrência de temporais é geralmente associada a condições de agitação muito energéticas e, é nestas circunstâncias, que a erosão das praias e o recuo da linha de contacto praia/duna é mais significativo. Estes eventos, além de serem determinantes na alteração da configuração do litoral, colocam em risco as populações e bens materiais existentes ao longo da costa (Ferreira, 1993).

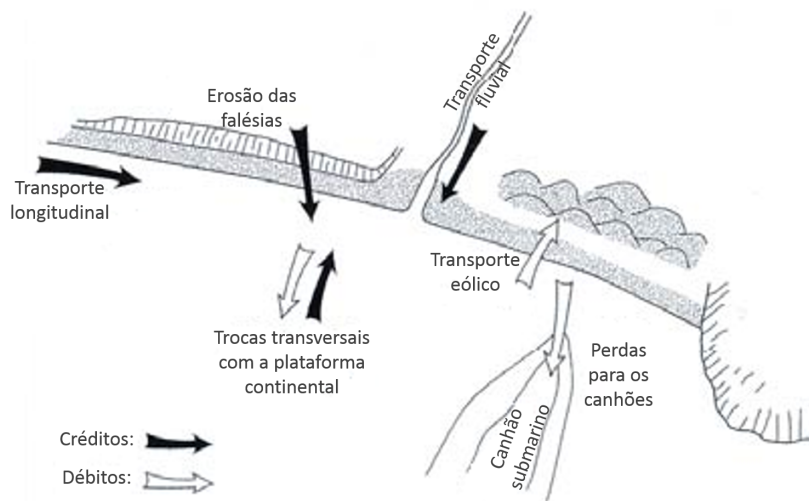


Figura 2.5: Principais processos que contribuem para o balanço sedimentar (adaptado de Komar (1998)).

## Capítulo 3

# Caracterização e Evolução da Zona de Estudo

Neste capítulo é feita uma caracterização da zona de estudo, com especial ênfase para a morfologia da costa, as condições meteorológicas típicas, o clima de agitação marítima, a evolução da linha de costa e as intervenções realizadas com o intuito de preservar a orla costeira. É, ainda, feita uma contextualização da história geológica recente da região costeira.

### 3.1 Enquadramento Histórico

O litoral entre Espinho e o Cabo Mondego é um troço de constituição e evolução geologicamente recentes (Figura 3.1). O comportamento construtivo deste litoral intensificou-se entre os anos 600 e 1000, através de pluviosidade abundante e ventos fortes. As cheias contribuíram para o aumento do volume de sedimentos transportados pelos rios e, consequentemente, pela corrente litoral, desenvolvendo-se uma restinga arenosa enraizada em Espinho migrando em direcção a Sul (Figura 3.2).

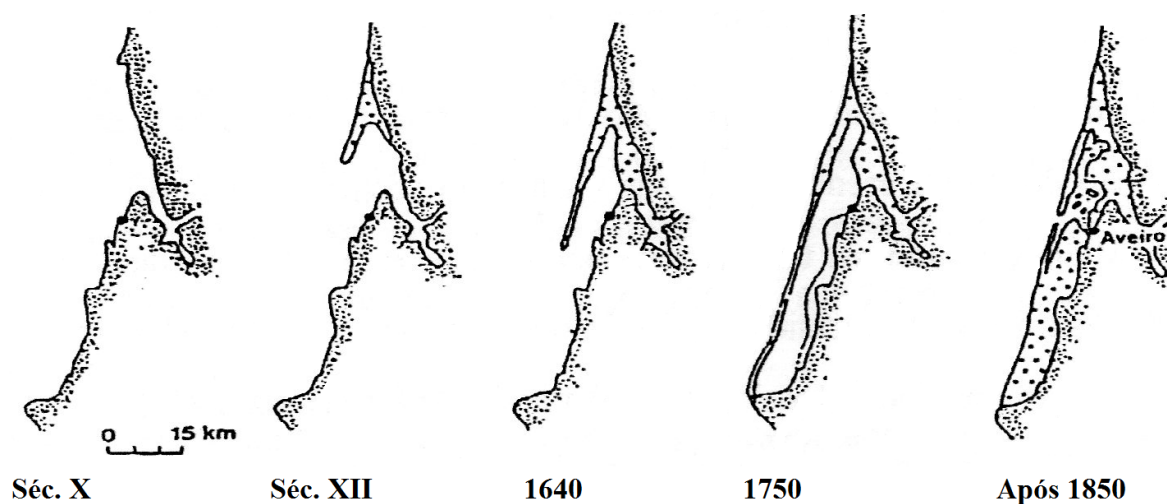


Figura 3.1: Fases de formação e evolução da laguna de Aveiro desde o séc. X (Adaptado de Gomes (1992) *in* Diogo (2004)).

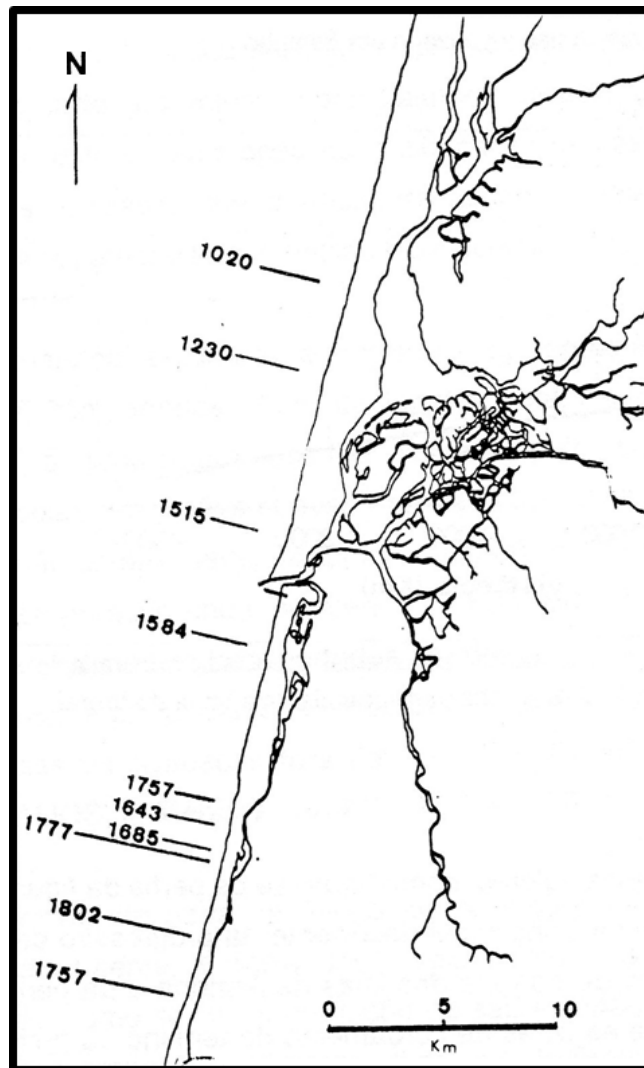


Figura 3.2: Localização das diversas posições da flecha arenosa ao longo do litoral aveirense (Pereira, 2000).

O crescimento da flecha arenosa para Sul levou ao isolamento do estuário do Vouga, transformando-o na actual laguna. A meados do século XVIII deu-se a união com os areais de Mira, formando-se um cordão arenoso contínuo. A frequência e intensidade destas condições levaram à formação de extensas praias arenosas que, sob a influência de ventos fortes construíram grandes corpos dunares. Até meados do século XIX, a restinga terá sido fortalecida pela adição contínua de sedimentos (Ferreira & Dias, 1992; Dias, 2004; Abrantes, 2005; Rebelo, 2007; Martins, 2011).

O crescimento do cordão litoral levou a problemas de salubridade e a difíceis condições de navegabilidade no interior da laguna. Em 1808 foi aberta artificialmente e fixada a ligação da laguna ao mar, na localização que até hoje se mantém (Figura 3.3). A abertura da laguna mostrava-se funcional, com boas condições de navegabilidade no seu interior e com facilidade na entrada das marés (Dias *et al.*, 1994; Martins, 2011).

A instabilidade da barra uma década depois da sua fixação levou, em 1818, à construção de um novo molhe na margem Norte, à distância de 300 m do molhe Sul. Contudo, a fragilidade

da estrutura comprometeu seriamente as obras e ano após ano as condições da barra iam-se deteriorando. Em 1859, houve um reforço no molhe Sul e construiu-se um novo molhe na margem setentrional da barra (Teixeira, 1994).

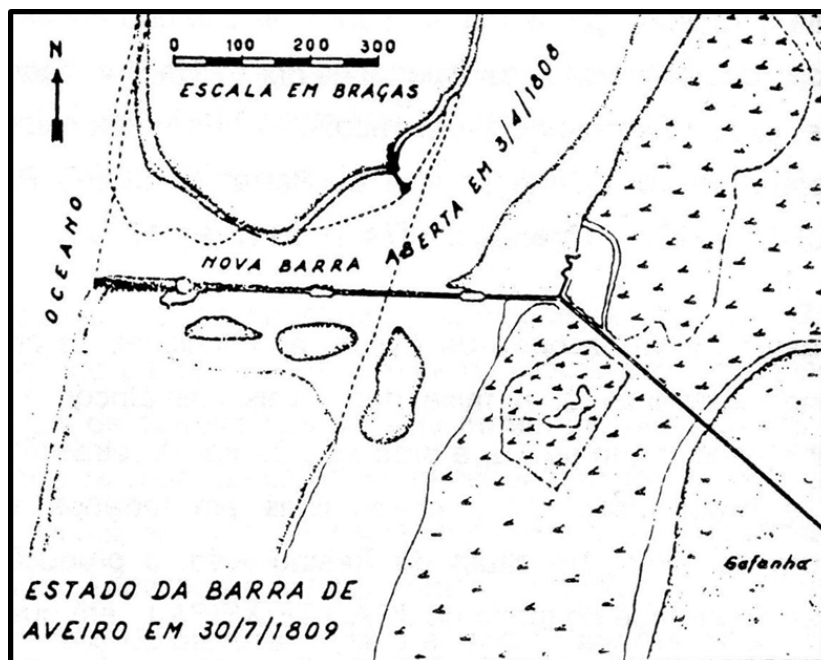


Figura 3.3: Planta da barra de Aveiro em 1809 (adaptado de Loura (1984) *in* Boto (1997)).

Durante a primeira metade do século XX o litoral manteve-se relativamente estável. Contudo, em meados do século, voltou a haver necessidade de melhorar e tornar funcional a barra e o acesso ao porto (Figura 3.4a). Por esse motivo, em meados do século XX, iniciaram-se as obras de reconfiguração da barra: com a construção de um dique triangular de concentração de correntes, prolongamento do molhe Norte numa extensão de 710 m e a construção de um novo mais a Sul, com 900 m de comprimento. Realizou-se, também, o aprofundamento do canal da barra para 7.2 m (Figura 3.4b). Após a conclusão das obras, em 1958, verificou-se uma barra funcional mas, por outro lado, graves consequências a sotamar. O prolongamento do molhe Norte veio interromper a deriva litoral, provocando forte déficit sedimentar a Sul, resultando no recuo da linha de costa (Dias *et al.*, 1994; Teixeira, 1994).

Anos mais tarde, o molhe Norte já se encontrava colmatado, contribuindo para o assoreamento da barra. Assim, entre 1983 e 1987, prolongou-se o molhe em mais 520 m, melhorando, por um lado, as condições de acesso à barra mas, por outro, agravando os problemas de erosão a Sul. O prolongamento do molhe Norte veio influenciar a dinâmica sedimentar local e provocar grandes alterações na deriva litoral, na evolução da linha de costa e na própria geomorfologia da região (Dias *et al.*, 1994; Teixeira, 1994).





(a) 1934



(b) 1958

Figura 3.4: Estado da barra do porto de Aveiro antes (1934) e após (1958) as obras de reconfiguração.

### 3.2 Localização Geográfica

A área de estudo integra o troço costeiro, adjacente à laguna de Aveiro, que se estende desde a praia da Barra à Praia de Mira, estando limitado a Norte pelo canal da Barra e a Sul pelo esporão Norte da frente urbana da Praia de Mira. O troço localiza-se na costa ocidental portuguesa, na Região Centro de Portugal (NUT II) e engloba as Unidades Territoriais do Baixo Vouga e do Baixo Mondego (NUT III) (Decreto-Lei n.º 46/89). Situa-se, quase na totalidade, no distrito de Aveiro, englobando os concelhos de Ílhavo, Vagos e Mira, este último pertencendo ao distrito de Coimbra (Figura 3.5).



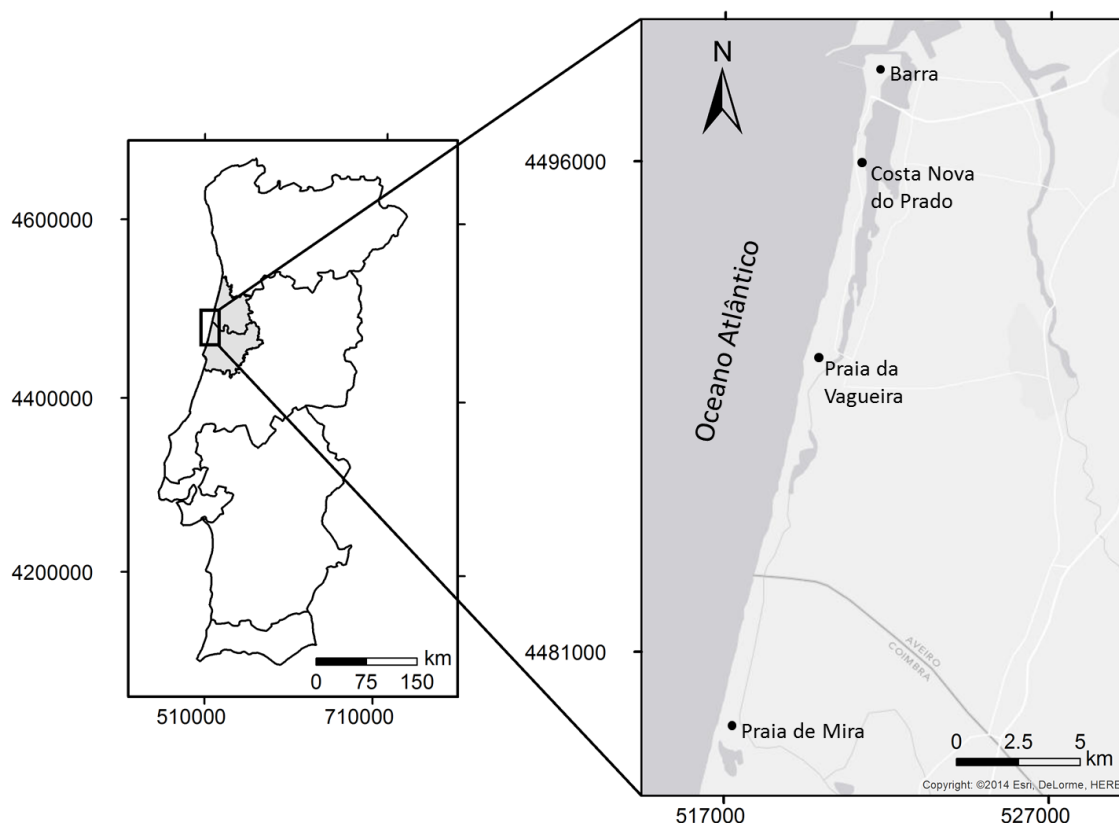


Figura 3.5: Localização geográfica da zona de estudo (projecção UTM).

### 3.3 Caracterização Geológica e Geomorfológica

A área de estudo enquadra-se na Orla Mesoceno-zóica Ocidental Portuguesa, que corresponde a uma bacia de sedimentação instalada no bordo ocidental do Maciço Hespérico. A bacia teve origem durante o Mesozóico, aquando da formação de uma fossa tectónica de direcção NNE – SSW, associada à abertura do Atlântico (Dias *et al.*, 1994).

A faixa continental adjacente ao litoral caracteriza-se por uma zona aplanada, de baixa altitude e de grande uniformidade topográfica, típica de uma planície costeira, que se estende desde Espinho até próximo da Nazaré (Ferreira, 1998). Nesta planície podem distinguir-se dois grandes grupos de formações de idade mais recente, que assentam sobre o substrato mesozóico e paleogénico (Bettencourt & Ângelo, 1992; Ferreira, 1993; Dias *et al.*, 1994) (Figura 3.6):

- O conjunto sedimentar do Plio-Plistocénico e Plistocénico de depósitos marinhos, fluviais e areias eólicas. Integra praias antigas e terraços fluviais que assentam sobre os depósitos do Cretácico e dispõem-se numa faixa paralela ao litoral com ligeira inclinação para Oeste;
- Os Depósitos Modernos do Holocénico, predominantes na zona de estudo, constituídos por aluviões, areias de duna e areias de praia. Os aluviões dispõem-se sobretudo junto à laguna de Aveiro, onde podem atingir espessuras de 40 m. As areias de praia formam um extenso cordão litoral, que se estende com direcção NE - SW em toda a região,

interrompido apenas pela abertura do canal da barra. A limitar as areias de praia para E estão as areias de duna, que se entendem de Espinho ao limite Norte da Serra da Boa Viagem, ocupando uma faixa com uma largura média de 5 km.

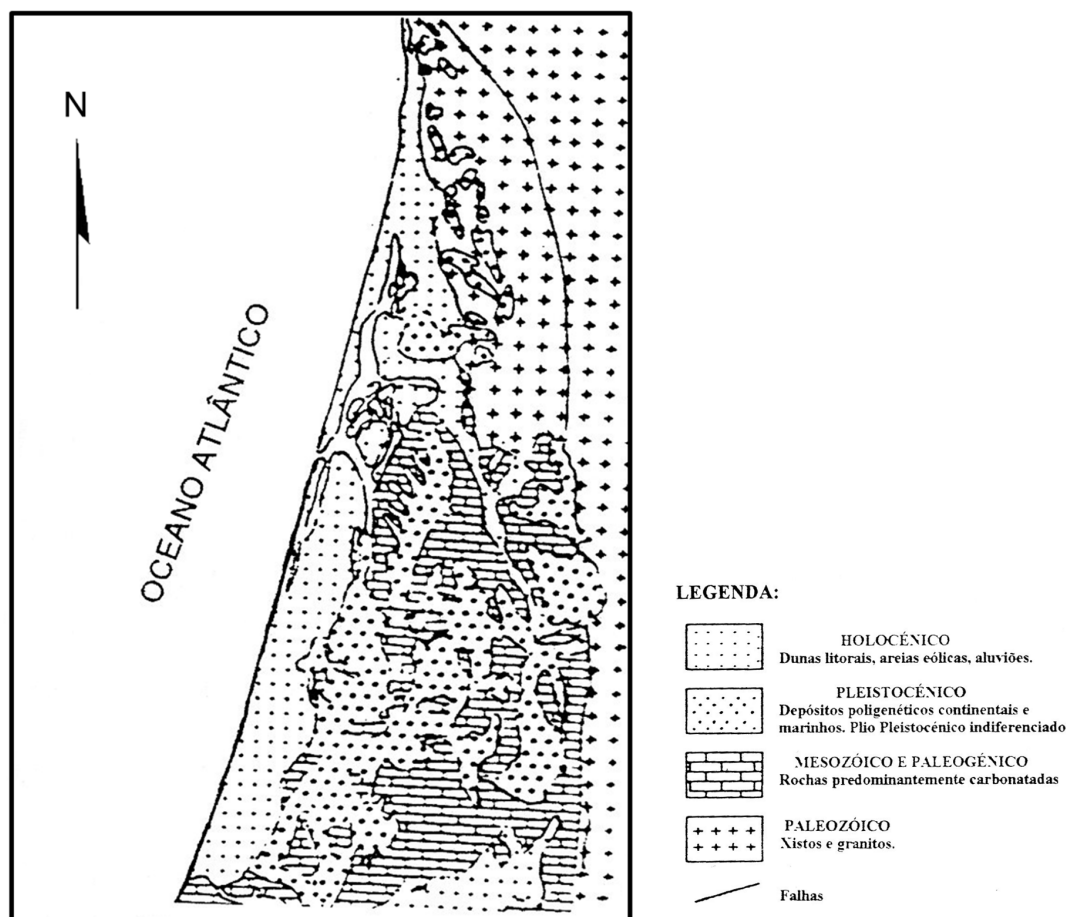


Figura 3.6: Enquadramento geológico da região em estudo (adaptado de Bettencourt & Ângelo (1992)).

A planície costeira é, parcialmente, ocupada pela laguna de Aveiro, separada do mar por um cordão arenoso de largura variável e que comunica com o oceano através de um canal artificial. O canal de Mira acompanha paralelamente o sector em estudo até à Praia de Mira. A Barrinha de Mira, localizada na Praia de Mira, é uma pequena lagoa que faz parte integrante da laguna de Aveiro. Actualmente, este corpo é pouco profundo com 800 m de largura e 1000 m de comprimento e cujos contornos são, maioritariamente, artificiais (Dias *et al.*, 1994).

### 3.3.1 Dunas

As dunas holocénicas integram dois tipos principais: o cordão dunar frontal e as dunas interiores que se podem diferenciar em vários sistemas, com forma e orientações distintas.

O cordão dunar frontal formou-se contigualmente à praia e a sua formação está ligada à existência de transporte eólico da praia para o interior e à capacidade de retenção de areia por

parte da vegetação costeira (Rebêlo & Brito, 2004). O cordão dunar estende-se de forma quase contínua ao longo de todo o sector, embora de largura muito reduzida, bastante degradado e parcialmente substituído por diques arenosos, com o objectivo de evitar galgamentos oceânicos. Noutros locais o cordão é interrompido por povoações como é o caso da Costa Nova, Vagueira e Praia de Mira (Ferreira & Dias, 1992; Ferreira, 1993).

Dada a importância do cordão dunar na protecção das zonas costeiras e o estado de degradação deste, têm sido efectuadas intervenções na tentativa de fixar, reconstruir e proteger as dunas. Em alguns locais, procedeu-se à aplicação de paliçadas e passadiços de madeira, para evitar a circulação das pessoas pelas dunas e formação de corredores eólicos, e plantação de vegetação para promover a fixação das mesmas. Noutros locais, a destruição completa do cordão dunar frontal, levou à construção de diques arenosos (Figura 3.7).



Figura 3.7: Paliçadas sob diques arenosos (re)construídos após Inverno rigoroso 2013/2014 para reforço do cordão dunar.

### 3.3.2 Praia

O troço entre a praia da Barra e o Cabo Mondego é constituído por praias arenosas e expostas. A continuidade da praia é interrompida por várias obras de engenharia costeira, nomeadamente, nas frentes urbanas das praias da Barra, Costa Nova, Vagueira e Praia de Mira. A praia contacta a oriente com o cordão dunar frontal/dique arenoso e a Oeste prolonga-se através da praia submersa.

#### Praia Emersa

No sector em causa, o contacto entre a praia emersa e o cordão dunar e o dique arenoso é caracterizado por escarpas de erosão. Em casos pontuais, onde não ocorre erosão significativa ou há estabilização da praia, nomeadamente, a barlar de obras transversais de protecção costeira, é possível observar dunas embrionárias e o contacto é promovido pela base da duna. Em muitos locais, em preia-mar de marés vivas, o espraio das ondas atinge a base da duna, o que reflecte a fragilidade destas praias relativamente à erosão.

Os perfis dominantes da praia emersa dependem das condições de agitação prevaletentes ao longo do ano. As praias apresentam um perfil dissipativo, durante o Inverno, devido à predominância das condições de agitação marítima mais energéticas. No Verão, e nas estações

de transição, domina o perfil reflectivo (Ferreira, 1993; Coelho, 2005). Esta variação não ocorre nas zonas situadas imediatamente a Sul de esporões, onde o que domina é o perfil dissipativo ou um estado intermédio. Já na década de 90 do século passado, de acordo com Ferreira (1998) eram raros os locais ou mesmo inexistentes, onde o contacto praia/duna é através da alta praia, mesmo durante o Verão, apenas existindo média e baixa praia ou só baixa praia, reflectindo a fragilidade destas praias relativamente à erosão. A largura da praia emersa é muito variável ao longo da faixa em estudo e ao longo do tempo para o mesmo local.

### **Praia Submersa**

A morfologia da praia submersa é dominada por barras arenosas, com uma orientação sub-paralela à costa. Ferreira (1993) identificou duas barras submersas distintas a partir de levantamentos batimétricos realizados entre Maio e Setembro de 1987 e em Dezembro de 1990 (Figura 2.4).

O acidente morfológico mais próximo da praia emersa é uma barra longilitoral, a barra interna. Esta apresenta reduzidas dimensões (0.5 m a 1.0 m de altura por 80 m a 120 m de largura) e localiza-se entre as batimétricas dos 0.5 m e 3.0 m do Z.H.. A sua formação deve-se aos sedimentos retirados da praia emersa por acção da ondulação, servindo como reservatório em situações de agitação marítima mais energética e restitui os sedimentos à praia em situações mais favoráveis, alimentando a berma existente ou originando outra. A sua presença tem uma variação temporal e espacial, sendo descontínua ao longo da área em estudo (Ferreira, 1993; Dias *et al.*, 1994).

A barra externa, a ocidente da interna, corresponde a uma importante acumulação sedimentar, alongada, subparalela à praia e com elevada variação de comportamento, tornando-se, assim, a forma mais importante e condicionante da morfologia da praia submersa. Na zona de estudo, a amplitude da barra, geralmente, não ultrapassava os 3 m e a sua largura raramente excedia os 400 m.

A barra é a primeira barreira às ondas que atingem a praia contribuindo para a dissipação de energia que, numa barra robusta, pode variar entre 83.7% e 99.7%. Quanto maior for a altura das ondas maior é a dissipação relativa. Quanto mais debilitada se encontra a barra, menor a quantidade de energia dissipada mas, a energia dissipada de encontro à praia emersa será muito maior (Ferreira, 1993).

## **3.4 Caracterização Climática**

O clima na costa ocidental portuguesa está fortemente condicionado pela sua posição geográfica, latitudes intermédias e na fronteira leste do Oceano Atlântico, e pela orientação da costa.

O tempo, nomeadamente a temperatura à superfície, a precipitação e o vento, é bastante influenciado pela Oscilação do Atlântico Norte (*North Atlantic Oscillation - NAO*), sobretudo no Inverno, entre Dezembro e Março. A NAO é o principal modo de variabilidade da pressão ao nível do mar no Norte do Oceano Atlântico. O padrão espacial da NAO consiste num dipolo com orientação aproximada Norte/Sul com um dos centros localizado sobre a Islândia e o outro, de sinal oposto, estendendo-se pelas latitudes médias do Atlântico Norte e centrado cerca dos 35°N, na zona dos Açores (IPMA, 2014b). Este padrão bipolar é reforçado durante fases positivas da NAO e enfraquece durante as fases negativas (Jones *et al.*, 1997).

A valores positivos do índice NAO está associado a um aumento da diferença de pressão que resulta em Invernos secos na Península Ibérica (Figura 3.8a). Por outro lado, valores negativos do índice NAO correspondem a um aumento de temporais e de precipitação (Trigo *et al.*, 2004) (Figura 3.8b).

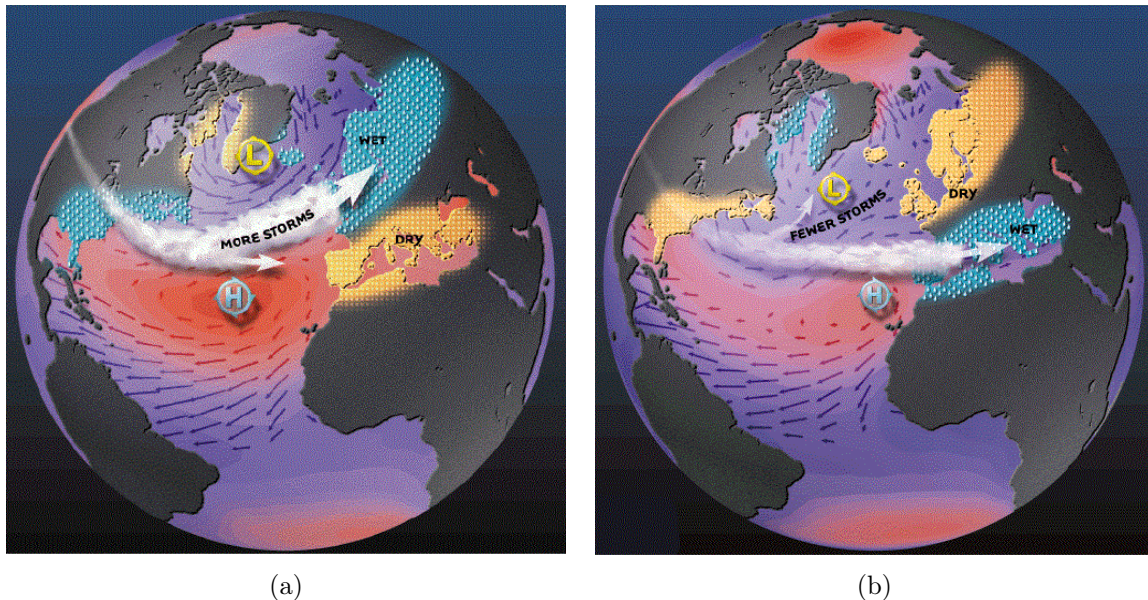


Figura 3.8: Condições climáticas observadas para o índice da NAO (a) positivo e (b) negativo (Visbeck, 2014).

Na Figura 3.9 é apresentado o comportamento do índice NAO nos últimos 150 anos para os meses de Inverno (Dezembro a Março). O padrão observado é bastante variável, contudo, é de salientar o prolongado período de índice negativo que se verificou desde o final de 2009 até ao início de 2011. O Inverno de 2010/2011, foi caracterizado pela ocorrência de fenómenos de tempo severo. Por outro lado, o Inverno de 2011/2012, que apresenta índice NAO positivo, caracterizou-se pela ausência de precipitação, o mesmo se verificou em 2007 e 2008 (IPMA, 2014a). No entanto, pode haver outros fenómenos que influenciem as condições meteorológicas, que a interpretação do índice NAO deve considerar.



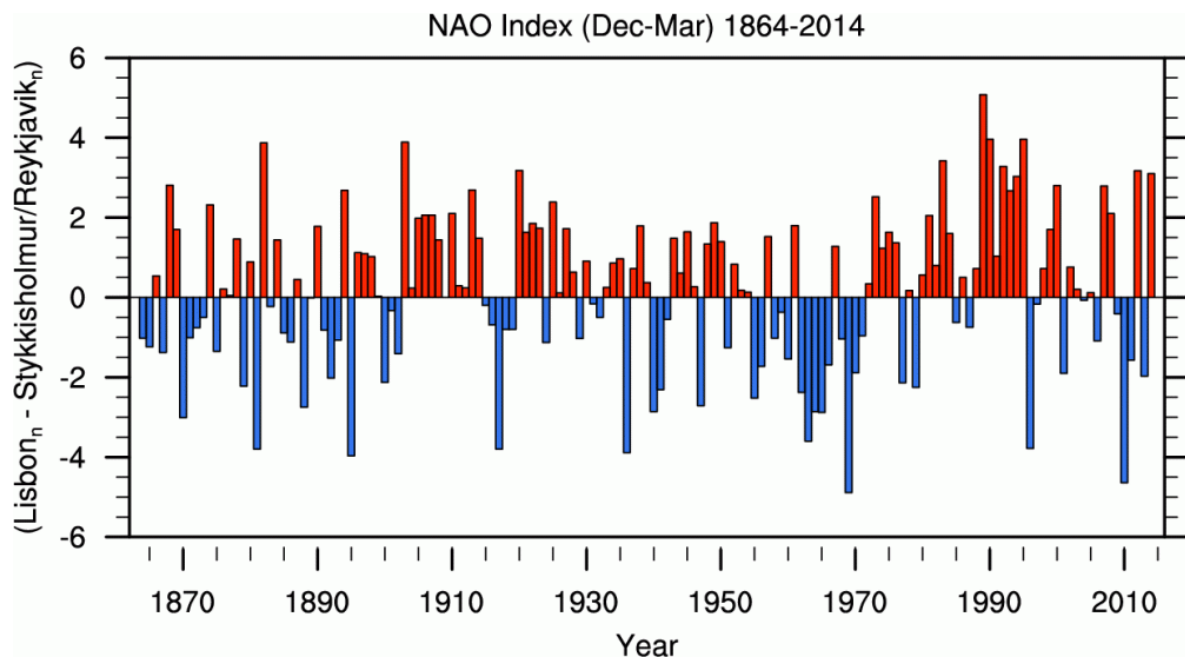


Figura 3.9: Índice da NAO para o Inverno (Dezembro a Março) de 1864 a 2014. O índice baseia-se na diferença normalizada da pressão à superfície do mar entre Lisboa, Portugal e Reykjavik, Islândia (Hurrell & National Center for Atmospheric Research Staff, 2014).

### 3.4.1 Vento

O vento é um elemento climático essencial na modelação das zonas costeiras, especialmente numa costa baixa e arenosa como a da zona de estudo. Este é o responsável pelo transporte de sedimentos da praia e dunas e pela geração da ondulação na superfície do mar, seja ao largo ou localmente.

O vento resulta do deslocamento de massas de ar devido a diferenças de pressão atmosférica entre duas regiões adjacentes. As variações de pressão na atmosfera devem-se às diferenças no aquecimento solar ao longo da superfície terrestre.

No litoral português, os ventos predominantes, no Verão, são do quadrante Norte, com relativa estabilidade direccional, contrastando com o regime dominante no Inverno cuja oscilação de rumos e intensidade é significativa. À circulação atmosférica geral, sobrepõe-se o clima local de brisas, com periodicidade diurna, que resulta do desigual aquecimento e arrefecimento da terra e do oceano. Durante o dia sopra de W ou NW com máxima intensidade para o fim da tarde, enquanto durante a noite a brisa sopra de E ou SE com máxima intensidade de madrugada. Este fenómeno é mais evidente no Verão, em condições de céu limpo e pouco nublado.

Lorenzo *et al.* (2011) realizou um estudo sobre a variabilidade da circulação atmosférica para o período de 1948 a 2008 para a região noroeste da Península Ibérica. Este trabalho relaciona a frequência de ocorrência a dez principais tipos de circulação (NE, E, SE, S, SW, W, NW, N, Anticiclónico (A) e Ciclónico (C)). A frequência relativa para cada tipo de circulação sinóptica para cada estação é mostrada na Figura 3.10.

A variação sazonal da frequência da circulação está bem definida, no Inverno predominam os ventos de W e SW e durante o Verão predominam os ventos de W, NW, N e NE. No

Outono, a frequência do tipo de circulação é muito semelhante ao que acontece no Inverno, no entanto, a Primavera é caracterizada por uma mistura entre as circulações do Inverno e Verão (Lorenzo *et al.*, 2011).

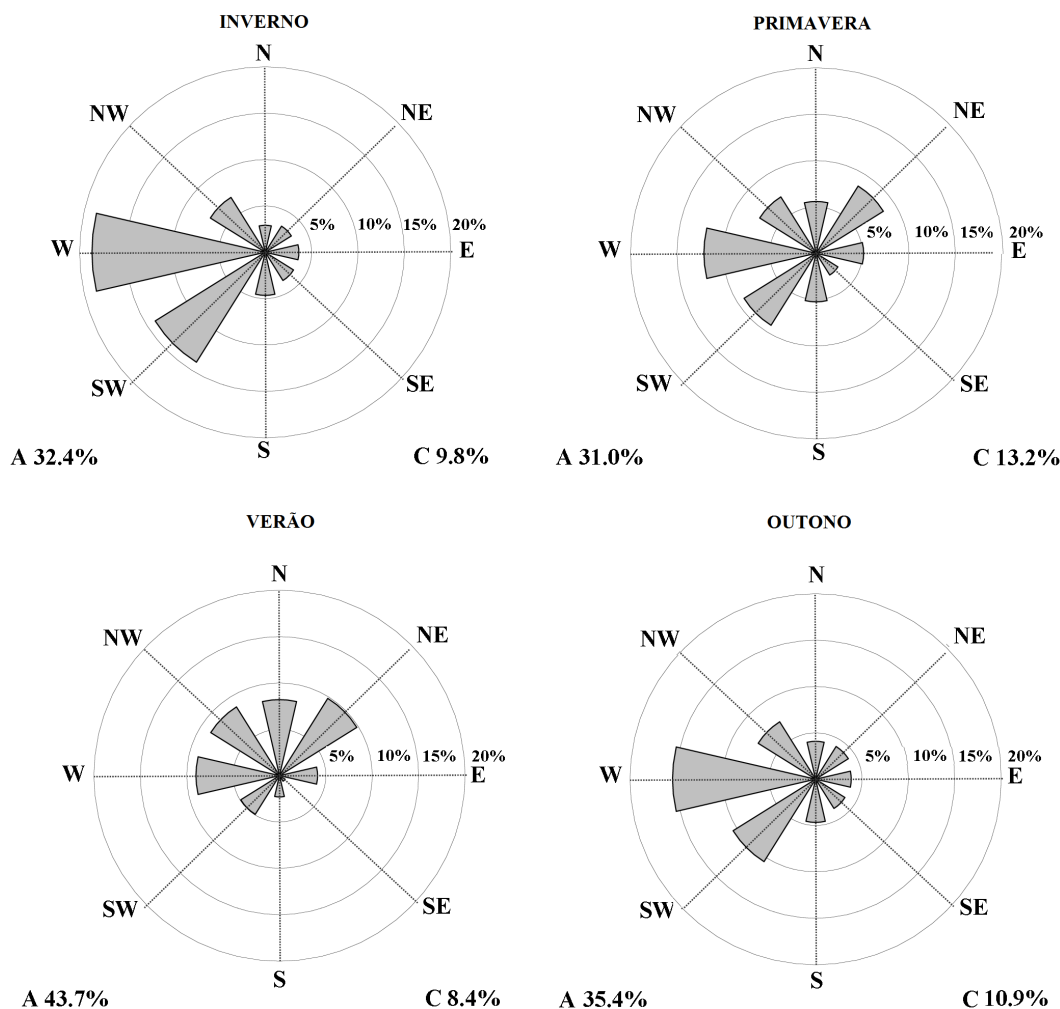


Figura 3.10: Média da frequência (%) do tipo de circulação no Inverno, Primavera, Verão e Outono (Lorenzo *et al.*, 2011).

O regime de ventos é muito irregular entre anos, no entanto, constata-se uma predominância dos ventos de N (regime de Nortada) durante o Verão. Segundo Ferreira (1993), os ventos com maior velocidade média pertencem ao quadrante SW e S, sobretudo no Inverno.

### 3.4.2 Outros Elementos do Clima

A temperatura e a humidade relativa, embora não tenham um papel significativo na morfologia das zonas costeiras, exercem, também, alguma influência. Estes factores condicionam o transporte eólico e a distribuição de espécies vegetais, fundamentais na fixação dos sedimentos nas dunas.

No que se refere ao regime térmico, as temperaturas são amenas durante todo o ano. A temperatura média anual mínima (11.0 °C) regista-se em Janeiro e a máxima (19.0 °C) em

Agosto, sendo a temperatura média anual de cerca de 15.0 °C. A amplitude térmica média não é muito elevada (7.9 °C), devido à acção moderadora do Oceano Atlântico.

Na costa, a precipitação ocorre sob a forma de chuva, de aguaceiros, de granizo e muito raramente de neve e a sua distribuição sazonal é bem marcada. No semestre húmido (Outubro a Março) concentra-se cerca de 75 % da precipitação anual, sendo os meses mais húmidos Dezembro e Janeiro, enquanto Julho e Agosto são os meses mais secos. A precipitação média anual ronda os 912 mm (Instituto Hidrográfico - IH, 1990). O valor médio anual da humidade relativa do ar é elevado (77.30 %) devido à proximidade de bacias de evaporação como o mar e a laguna (Boto, 1997).

### 3.5 Caracterização Oceanográfica

Nesta secção pretende-se analisar os aspectos relacionados com as condições de agitação marítima, nomeadamente, o regime de marés e os fenómenos de dinâmica costeira que se fazem sentir nesta zona, uma vez que, estes são de extrema importância no transporte de sedimentos através da deriva litoral e, conseqüentemente, na alimentação das praias.

#### 3.5.1 Marés

A maré na costa ocidental portuguesa tem uma regularidade semidiurna, sendo dominada pelas componentes lunar  $M_2$  e solar  $S_2$ . Apresenta uma periodicidade de 12 horas e 25 minutos e propaga-se de Sul para Norte, com amplitudes a diminuir para o largo (Marta-Almeida & Dubert, 2006). A onda de maré é mesomareal, com amplitudes que variam entre os 3.00 m durante condições de marés vivas e pouco menos de 1.00 m em marés mortas (Ferreira, 1993). Com base na tabela de marés (2013) no porto de Aveiro, a amplitude máxima registada foi de 3.67 m enquanto que a mínima foi de 0.35 m, ambas referidas ao Z.H.; e o nível médio da maré corresponde aos +2.00 m Z.H..

A amplitude da maré tem um efeito importante na morfologia da praia, determinando a largura desta, sujeita a um período alternativo de seco e molhado e ao impacto das ondas que, por sua vez, tem influência no desenvolvimento do perfil de praia, contribuindo para o movimento de sedimentos ao longo desta.

#### 3.5.2 Clima de Agitação Marítima

A costa ocidental está exposta à ondulação gerada no Atlântico Norte e, naturalmente, a agitação marítima na costa é caracterizada por componentes de geração distante tendo, em geral, alturas e períodos superiores aos que ocorreriam por simples acção do vento local (designada por vaga - *sea*). Segundo Cunha & Dinis (1998), durante a maior parte do ano, com o anticiclone próximo dos Açores, existe ondulação de NW. A menos frequente, ondulação de W e SW está associada a focos depressionários e à passagem das respectivas superfícies frontais.

Segundo o Roteiro da Costa de Portugal (Instituto Hidrográfico - IH, 1990) foram identificadas cinco condições de agitação marítima características na costa ocidental:

- Mar de Noroeste – ocorre cerca de 80 % do ano, sendo as condições de agitação marítima mais frequente. Este estado é caracterizado por ondulação de NW, gerada a latitudes elevadas no Atlântico Norte, e da vaga associada a ventos locais de N e NW. No Inverno



e períodos de transição a altura das ondas rondam 2.5 m e períodos de 9 s e no Verão as alturas são de 1.0 a 1.5 m e períodos de 7 a 8 s.

- Mar de Sudoeste – está associado a depressões ou superfícies frontais originando áreas de geração de SW junto à costa e ocorre sobretudo no Inverno e períodos de transição; são características alturas de onda de 3.0 a 4.0 m com períodos de 9 a 10 s.
- Temporal de Oeste – ocorre quando a frente polar desce até às latitudes de Portugal, formando no Atlântico Norte áreas de geração de ventos de SW; característico do Inverno, gera ondulação de W com alturas de ondas de 8.0 m e períodos de 16 s e com duração da ordem de 8 dias ou mais.
- Mar de Fora – ocorre quando o vento na costa ocidental é fraco ou o seu rumo é dos quadrantes de terra, sendo a costa atingida por ondulação proveniente de áreas distantes; as direcções mais frequentes da ondulação são de NW e W, a altura características das ondas são de 1.5 a 2.0 m e cerca de 14 s de período.
- Mar Banzeiro – semelhante à situação anterior mas, neste caso, não existem significativas áreas de geração distante. Nestas condições a agitação marítima é quase sempre de NW ou WNW com alturas de cerca de 0.5 m e ocorre em cerca de 4 % do ano.

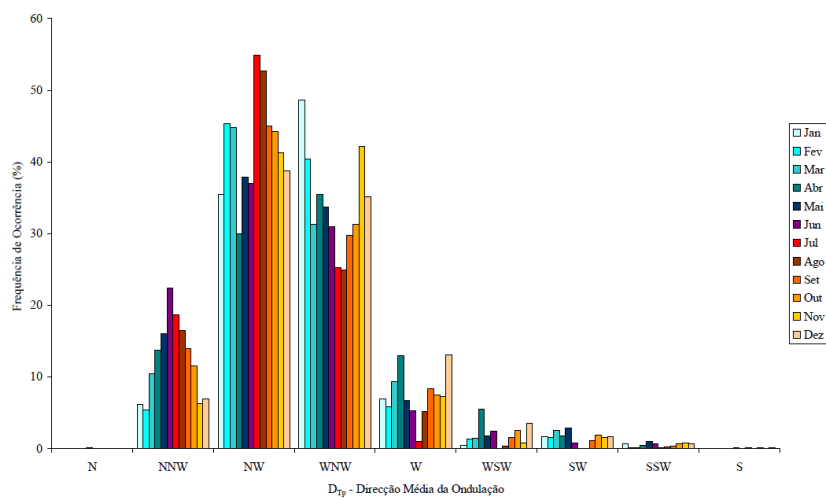
Coelho (2005) realizou uma análise da agitação marítima com dados da bóia ondógrafo de Leixões para o período de 1981 a 2003 (apresentando algumas lacunas dentro deste intervalo). Foram recolhidos os valores relativos à altura significativa ( $H_s$ ), ao período médio ( $T_{H_s}$ ) e, a partir de 1993, foram recolhidos, também, valores relativos à direcção média ( $D_{Tp}$ ). As Figuras 3.11a, 3.11b e 3.11c são resultado dessa análise e mostram a distribuição mensal para os três parâmetros.

No que diz respeito à direcção da ondulação, o sector NW representa 42.4 % do total de registos de rumos e ocorre em qualquer altura do ano e com maior frequência. As ondas proveniente de SW representam apenas 3.9 % e ocorrem sobretudo no Inverno. A ondulação de W corresponde 7.7 % do total de registos. Nos meses de Verão predomina a ondulação do quarto quadrante, NNW, NW e WNW, que está associada aos ventos predominantes nesta estação (ventos de N e NW). Ondulação do terceiro quadrante (W, WSW e SW) ocorre, sobretudo, no Inverno.

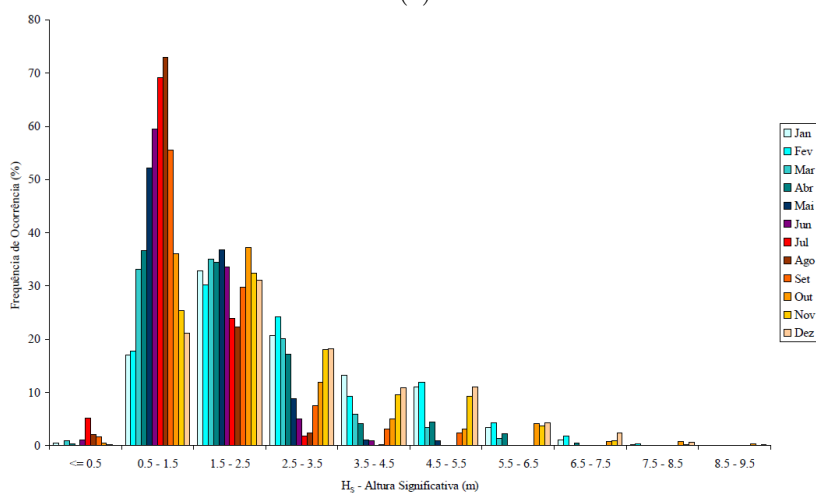
Os registos de alturas de onda significativa revelaram que, nos meses de Verão, a média dos valores de altura significativa desce, verificando-se valores inferiores a 4.5 m para os meses de Junho, Julho e Agosto. Para os meses de Inverno, de Dezembro a Fevereiro, alturas de onda inferiores a 1.5 m representam cerca de 20.0 % do total de registos, enquanto para os meses de Julho e Agosto ultrapassam os 70.0 %; as alturas de onda superiores 4.5 m apenas se verificam nos meses de Inverno.

O comportamento para os períodos de onda é semelhante à altura significativa, não se registando períodos superiores a 14 s para os meses de Maio a Agosto. Por outro lado, no Inverno, são mais frequentes períodos de onda superiores.

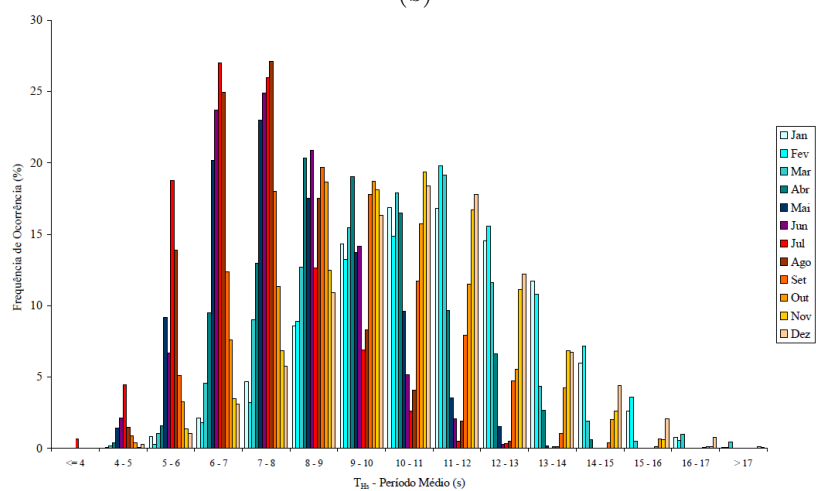
Em suma, a alturas de onda superiores correspondem períodos de onda mais elevados (períodos de Inverno) e de forma análoga, a alturas de onda inferiores correspondem frequências maiores e menores períodos de onda (meses de Verão) (Coelho, 2005).



(a)



(b)



(c)

Figura 3.11: Distribuição mensal de a) direcção de procedência da ondulação, b) altura de onda significativa e c) período de onda médio para os dados da bóia ondógrafo de Leixões (1993 a 2003) (Coelho, 2005).

### 3.5.3 Temporais

A costa portuguesa está, frequentemente, sujeita à acção de temporais, que são os principais agentes de erosão costeira. Os temporais que atingem a costa podem ser bastante violentos, gerando grande agitação marítima com ondas de longo período. O potencial destrutivo dos temporais é maior em litorais expostos, com valores de "fetch"<sup>1</sup> elevados, uma vez que os níveis energéticos da agitação marítima incidente são muito grandes (Ferreira & Dias, 1997).

Estudos elaborados no âmbito da caracterização do regime de temporais na costa ocidental portuguesa, como o trabalho de Pita & Santos (1989) e Ferreira (1993), distinguem duas épocas quanto ao número de eventos de temporal. O Inverno marítimo compreende os meses de Outubro a Março e é o período em que ocorre maior incidência de eventos. Por outro lado, o Verão marítimo abrange os meses de Abril a Setembro e é caracterizado por um reduzido número de temporais de baixa intensidade e curta duração.

De acordo com os dados de Pita & Santos (1989), relativos à ocorrência de temporais para o período de 1956 e 1988, no Inverno marítimo ocorre cerca de 94.8 % das observações, que incidem, principalmente, nos meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro, e no Verão marítimo ocorre cerca de 5.2 % das observações. Foram identificados um total de 97 temporais, acontecendo, em média, 3 temporais por ano. Os eventos mais frequentes apresentam alturas máximas significativas entre 5.0 m e 6.0 m, correspondendo entre 57.0 % a 91.0 % do total de temporais, enquanto que alturas superior a 10.0 m constituirão 3.0 % a 17.0 % do total de ocorrências. Quanto ao rumo dos temporais, as direcções mais frequentes são de W e WNW.

Costa *et al.* (2001), Vitorino *et al.* (2002) e Pinto *et al.* (2014) estudaram o regime de agitação marítima para a costa NW. O estudo de Vitorino *et al.* (2002) revela que para o período de Julho de 1996 e Junho de 1999, ocorreram 19 temporais, caracterizados por alturas significativas superiores a 5.0 m e períodos superiores a 10 s que atingiram a costa no Inverno e nos períodos de transição. Os resultados revelaram 2 tipos de temporais: um caracterizado por forte ondulação de NW ou SW (temporal mais comum na costa ocidental portuguesa) e outro correspondente a temporais de W, que ocorrem, tipicamente, uma vez por ano. A maioria destes eventos de temporal e, principalmente, os temporais de W estão associados a ventos de Sul. A análise da evolução de eventos extremos nas duas últimas décadas, no trabalho de Pinto *et al.* (2014), evidencia um aumento na frequência dos temporais assim como a sua intensidade.

#### *Storm Surge*

O *storm surge* traduz-se como sendo uma sobrelevação do nível do mar devido a factores meteorológicos, nomeadamente, variações da pressão atmosférica ou acção de ventos fortes e prolongados. A sobrelevação corresponde à diferença entre o nível de maré observado e a altura da maré astronómica prevista (Ferreira, 1993). Este fenómeno ocorre, sobretudo, devido a variações locais da pressão atmosférica, originadas por um centro de baixas pressões a N ou NW de Portugal.

A sobrelevação do nível do mar é um fenómeno importante que deve ser considerado nas decisões de ordenamento e gestão costeiras (Gama *et al.*, 1994). Os danos que podem causar dependem muito da fase da maré em que o fenómeno ocorre, isto é, uma sobrelevação que ocorra em baixa-mar apresenta menor perigosidade do que se o mesmo acontecer durante uma

---

<sup>1</sup>Fetch: distância da superfície oceânica sobre a qual actua o vento (Komar, 1976)

preia-mar. A pior situação acontece quando coincide uma grande sobreelevação com maré cheia equinocial e um grande temporal.

Taborda & Dias (1992) analisaram os dados de 8 estações maregráficas espalhadas pela costa portuguesa, durante o período em que ocorreram dois temporais, um a Fevereiro/Março de 1978 e outra a Dezembro de 1981. Durante estes temporais, os valores máximos da sobreelevação do nível do mar variam entre 0.4 e 0.9 m para a primeira tempestade e entre 0.4 e 1.2 m para a segunda. Para a estação de Aveiro o valor da sobreelevação máxima registada foi de 1.2 m, atingindo o nível máximo de 3.6 m.

O estudo de dados maregráficos de Junho de 1986 a Maio de 1988, realizado por Gama *et al.* (1994), revelou valores máximos superiores a 0.4 m. Para a estação de Aveiro verificou-se uma sobreelevação máxima de 0.8 m. Foram, também, calculados os períodos de retorno dos níveis extremos e, para um período de retorno de 10 anos, os níveis são de 4.6 m em Viana do Castelo e 4.1 m em Cascais, correspondendo a 0.5 m e 0.3 m acima do nível máximo atingido pela maré prevista. Para Aveiro, *storm surges* com amplitudes de 0.6 m, 0.8 m e 1.2 m apresentam períodos de retorno de 2, 10 e 100 anos, respectivamente (Picado *et al.*, 2013).

#### 3.5.4 Deriva Litoral

A corrente de deriva litoral é a responsável pelo transporte de sedimentos ao longo da costa ocidental portuguesa. Esta é induzida pela incidência das ondas obliquamente à costa, em consequência da qual se geram correntes com resultante longitudinal, com direcção predominante Norte-Sul (Ferreira, 1993; Dias, 2007). A direcção dominante da deriva litoral pode ser observada pela acreção de sedimentos a Norte dos obstáculos à corrente, como sejam os molhes dos portos e as obras transversais de protecção costeira (esporões).

Os valores apontados para a resultante da deriva litoral anual dependem essencialmente de parâmetros hidrodinâmicos, como é o caso da altura de onda e direcção de incidência. Vários autores estimaram valores médios para a resultante da deriva litoral considerando diversos métodos, como seja a avaliação da retenção sedimentar a barlamar de obras de protecção costeira, os métodos de análise de balanços sedimentares ou métodos de determinação de transporte sedimentar.

Com base em pesquisa bibliográfica sobre a carga da deriva litoral, Ferreira (1993) estimou que o volume total deverá ser superior  $1.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ , mas não ultrapassará os  $2.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ . Contudo, este valor pode estar subestimado, pelo facto de os molhes não serem capazes de reter totalmente o transporte litoral.

Segundo Teixeira (1994), o valor da deriva litoral situa-se entre  $1.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$  e  $1.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ , valor este que está muito aquém da carga necessária para cessar a erosão que ocorre no troço Espinho - Cabo Mondego, que seria de  $2.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$  (este valor compensaria a perda por transferência de sedimentos para a plataforma continental).

Dias *et al.* (1994) referem que devido ao pequeno abastecimento sedimentar, a deriva litoral não se encontra saturada. Para que se verifique a sua saturação, ocorre a erosão das praias e dunas, com o consequente recuo da linha de costa. Estes autores consideram, ainda, que o valor médio da deriva litoral entre a praia da Barra e a do Areão é cerca de  $2.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$  (Silva *et al.*, 2012).

### 3.6 Intervenções Costeiras

Os molhes que protegem a entrada à laguna de Aveiro foram construídos na década de 50 do século passado, com um comprimento aproximado de 700 m. Nos anos 80 o molhe Norte encontrava-se praticamente colmatado o que contribuía para o assoreamento do canal de navegação e, por isso, foi realizado o prolongamento de 500 m, bem como várias obras de regularização do canal. De modo a responder às necessidades do porto a entrada do canal tem sofrido algumas intervenções nos últimos anos, nomeadamente dragagens de manutenção (Quevedo *et al.*, 2011).

A retenção de sedimentos pelos molhes provoca grande carência sedimentar a Sul. Tornou-se visível o emagrecimento das praias, tendo sido construídas diversas estruturas de protecção costeira, e de forma a minimizar este efeito, nomeadamente nos sectores onde a pressão urbanística é elevada (Figura 3.12).

Em 1972/73 foi construído o campo de esporões da Costa Nova que, actualmente, é constituído por 5 esporões (E1 a E5) e uma protecção frontal aderente junto ao esporão Sul (1992/93) com o objectivo de proteger a duna da erosão devido à rotação da linha de costa. Na Vagueira, em 1979 foram construídas as primeiras obras de defesa: uma protecção frontal aderente, enrocamento, seguida de dois esporões (E6 e E7, directamente associado ao enrocamento), cada um com 250 m, a Sul da povoação. Em 2002/2003 foram construídos os esporões do Areão (E8) e do Poço da Cruz (E9), a Sul da Vagueira. Na Praia de Mira estão construídos dois esporões a Sul (E10 e E11), que datam da década de 80 (Quevedo *et al.*, 2011). Estas estruturas já sofreram várias intervenções, algumas de carácter urgente ou reparações após temporais e outras de manutenção. Frequentemente, também são realizados reforços do cordão dunar ou de diques arenosos e realimentações artificiais da praia, emersa e imersa.

Em 2009, iniciaram-se as obras de reconfiguração da barra do porto de Aveiro, que consistiram no prolongamento do molhe norte em 200 m e na dragagem de um novo canal de navegação na zona da barra com aprofundamento do canal para 13.2 m (Atkins, 2009). Os dragados provenientes das obras foram depositados numa zona de praia submersa da Costa Nova, entre os 3° e 5° esporões, do campo de esporões da Costa Nova. Foram depositados um total de  $2.9 \times 10^6 \text{ m}^3$  de sedimentos distribuídos ao longo do tempo de duração da obra como descrito da Tabela 3.1.

As obras foram concluídas em Dezembro de 2013 e, por enquanto, os objectivos para a navegação e acesso ao porto foram atingidos. No entanto, ainda são desconhecidos os impactos no litoral a sul da barra.

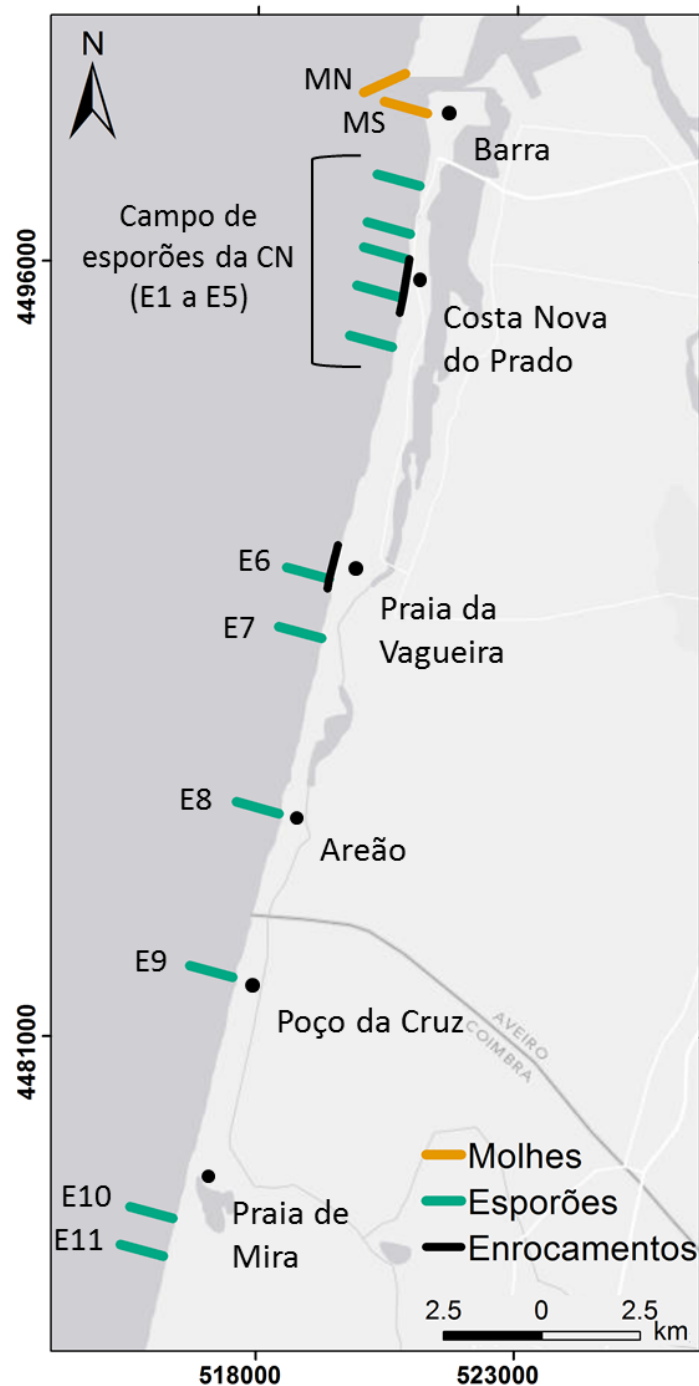


Figura 3.12: Esquema da localização das estruturas de defesa costeira no sector Barra - Praia de Mira, onde E1 a E11 representam os esporões e MN e MS correspondem ao molhe Norte e ao molhe Sul do porto de Aveiro (projecção UTM).

Tabela 3.1: Dragagem de inertes no porto de Aveiro (informação cedida pela APA)

Ano	Volume dragados ( $m^3$ )	Local de dragagem	Local de deposição
2009	1 099 223	Dragagem da barra de Aveiro com reforço do cordão dunar (a sul)	Imersão no mar, entre as batimétricas -2 m e -5 m (Z.H.), entre os esporões 3 e 5, a sul do molhe sul
2010	279 000	Porto de Pesca Costeira + Porto de Pesca do Largo + Canalete + Terminal Químico + Curva da Navalria + Canal Principal + Terminal Sul	50.000 $m^3$ - imersão no mar, entre as batimétricas -2 m e -5 m (Z.H.), entre os esporões 3 e 5, a sul do molhe sul; 229.000 $m^3$ - imersão a 6 milhas da costa
2011	0	-	-
2012	169 218	Dragagem de construção do prolongamento do molhe em 120 m	Imersão no mar, imediatamente a sul do molhe sul
2013	1 604 918	Dragagem de construção do prolongamento do molhe em 80 m; Dragagem de aprofundamento do canal de navegação	Imersão no mar imediatamente a sul do molhe sul; Imersão no mar, entre as batimétricas -2 m e -5 m (Z.H.), entre os esporões 3 e 5, a sul do molhe sul
<b>Total</b>	3 152 359	-	-

### 3.7 Evolução Recente da Linha de Costa

Ferreira (1993) determinou a evolução da linha de costa, de 1947 a 1990, a partir da análise de fotografias aéreas complementada com monitorização no campo, desde 1988. O contacto praia/duna foi o considerado como representativo da linha de costa, uma vez que é muito mais estável do que o contacto "praia/mar". As medições foram efectuadas em cada 275 m tendo em conta uma linha de base previamente traçada e os resultados obtidos são os resumidos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Taxas médias de variação da linha de costa em m/ano (adaptado de Ferreira (1993))

Sector	1947/1958	1958/1970	1970/1980	1980/1990
<b>Barra - Costa Nova</b>	-4.6	-4.3	-4.4	+4.5
<b>Costa Nova - Vagueira</b>	-1.5	-6.3	-3.8	-3.7
<b>Vagueira - Areão</b>	-0.1	-1.6	-2.4	-3.8
<b>Areão - Mira</b>	-	-1.3	-1.4	-1.8

Em 1958, após conclusão da construção dos molhes que protegem a entrada da laguna, os problemas de erosão ainda não eram muito visíveis. Até à década de 70, sem a existência de obras de protecção costeira, verificava-se erosão mais acentuada até à Vagueira, com valores de recuo máximos de 6.3 m/ano, de 1958 e 1970, para este sector (Ferreira, 1993). Enquanto da Vagueira à Praia de Mira, o recuo da linha de costa ainda era pouco perceptível. Foi a partir da década de 70 que estes começaram-se a intensificar. Este facto está relacionado, por um lado, com a diminuição do aporte de sedimentos para sotamar dos molhes e, por outro devido à implantação dos esporões que contribuem para o aumento da erosão a sotamar.

O campo de esporões da Costa Nova favoreceu o aumento da erosão a Sul, atingindo taxas de recuo de 8.0 m/ano. A construção dos esporões na Vagueira abrandou as taxas de erosão para aquela zona e o enrocamento "fixou" a linha de costa em frente à zona urbana da Vagueira; porém, a Sul, até ao Areão, registavam-se recuos médios de 5.0 m/ano. Na Praia de Mira, a implantação dos esporões veio contribuir para o avanço da linha de costa na zona urbana (Figura 3.13a).

De 1998 a 2002, o troço litoral até ao Poço da Cruz é dominado pela erosão com taxas de recuo máximas de 18.0 m/ano. Na Vagueira o recuo da linha de costa estabilizou; contudo, no Labrego, a construção do esporão implicou graves consequências a sotamar. Entre o Poço da Cruz e a Praia de Mira registou-se acreção, havendo avanço da linha de costa de 4.0 m/ano (Figura 3.13b).

De 2002 a 2010, assinala-se a edificação dos esporões do Areão (2002) e do Poço da Cruz (2003). As obras implantadas reteram sedimentos a barlar, estabilizando o recuo da linha de costa e até contribuindo para o avanço da mesma com valores de 4.0 m/ano. Por outro lado, a sotamar dos esporões o recuo registado foi superior a 5.0 m/ano (Figura 3.13b).

A regressão da linha de costa estende-se por mais de 20 km para Sul, demonstrando a deficiência sedimentar deste segmento causada pela retenção no molhe Norte dos sedimentos transportados pela deriva litoral para Sul. Contudo, as taxas de erosão foram diminuindo de Norte para Sul.



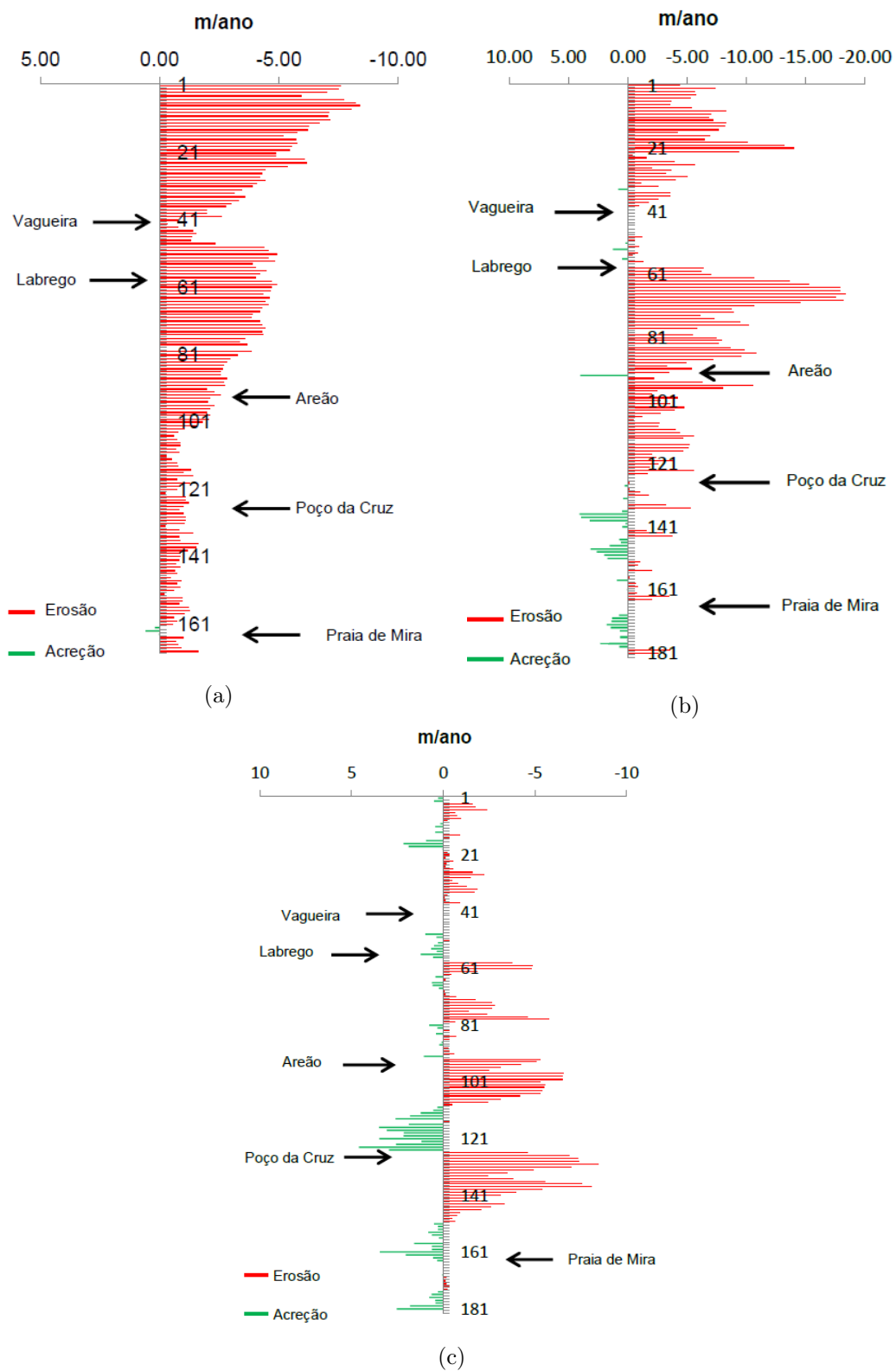


Figura 3.13: Taxa de erosão e acreção (m/ano) entre (a)1970 e 1998 (b)1998 e 2002 e (c)2002 e 2010. No eixo vertical estão representados os transeptos (Maia, 2012).

## Capítulo 4

# Dados e Métodos

O desenvolvimento deste trabalho baseou-se na análise de dados topográficos e batimétricos adquiridos no âmbito de um programa de monitorização. Para a escala espacial utilizada foram considerados 5 sectores do sistema litoral em estudo. Em relação à escala temporal definiram-se dois domínios principais de análise: evolução ao longo da última década (2003 - 2013) e evolução recente (último ano).

Foi também efectuada uma análise de dados de agitação marítima, através da validação de dados simulados com o objectivo de corrigir algumas lacunas na série temporal registada pela bóia ondógrafo de Leixões.

A análise realizou-se em ambiente SIG utilizando o *software ArcGis* da *Esri*, versão *10.1*, recorrendo a algumas das suas extensões para a elaboração de TINs e determinação de volumes. Posteriormente, utilizou-se o *software MATLAB* da *Mathworks*, versão *R2013b*, para o cálculo de variações de volumes, tratamento e análise dos dados de agitação marítima, bem como um conjunto de dados simulados disponibilizados pelos Puertos del Estado (Espanha).

### 4.1 Dados

A informação utilizada neste trabalho contempla os dados topográficos e batimétricos de campanhas efectuadas, dados topo-batimétricos cedidos pela APA, S.A. e dados de agitação marítima registados pela bóia ondógrafo de Leixões e um conjunto de dados simulados.

#### 4.1.1 Dados Topográficos

Os dados topográficos da praia emersa foram adquiridos a partir de campanhas realizadas com um veículo todo-o-terreno com um sistema GPS instalado (dados UA). Os conjuntos de dados utilizados datam de Novembro de 2003, Janeiro de 2008, Dezembro de 2011 e Março de 2012, Outubro de 2013, Fevereiro e Abril de 2014.

Os dados foram tratados através de processamento, análise, limpeza e filtragem de posições. Os ficheiros usados estavam organizados em três colunas correspondentes à latitude, longitude e altitude. As duas primeiras colunas estão em coordenadas planimétricas referidas ao Datum 73 e a altitude referenciada ao datum altimétrico do marégrafo de Cascais, que corresponde ao nmm, ou seja, +2.00 m do Z.H..

De forma a facilitar a análise dos dados e tendo em atenção as barreiras impostas pelos esporões dividiu-se o troço Barra - Praia de Mira em 5 sectores:

- Barra - Costa Nova (BCN) com cerca de 4.0 km de comprimento
- Costa Nova - Vagueira (CNV) com perto de 5.0 km de comprimento
- Vagueira - Areão (VA) com 4.5 km de comprimento
- Areão - Poço da Cruz (APC) com 3.3 km de comprimento
- Poço da Cruz - Praia de Mira (PCM) com cerca de 4.8 km de comprimento

Os dados, por questões de logística, não cobrem todos os sectores (Tabela 4.1). A informação relativa a Dezembro de 2011 e Março de 2012 foi agrupada no mesmo conjunto e considerada de 2012.

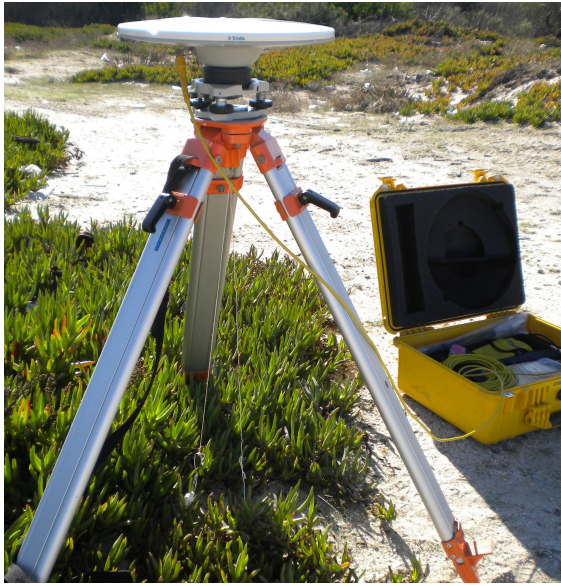
Tabela 4.1: Dados topográficos utilizados.

Ano	Mês	Troço com dados
<b>2003</b>	Novembro	Costa Nova - Praia de Mira
<b>2008</b>	Janeiro	Costa Nova - Praia de Mira
<b>2012</b>	Dezembro (2011)	Vagueira - Areão
	Março	Poço da Cruz - Praia de Mira
<b>2013</b>	Outubro	Barra - Praia de Mira
<b>2014</b>	Fevereiro	Barra - Praia de Mira
<b>2014</b>	Abril	Vagueira - Praia de Mira

## Campanhas

Os dados da praia emersa que se inserem na evolução recente da zona de estudo foram adquiridos com o sistema INSHORE para monitorização de litorais arenosos, desenvolvido por Baptista *et al.* (2011). Este sistema consiste na utilização de três antenas GPS, um distanciómetro laser e uma unidade de medição inercial montados numa estrutura triangular que é suportada na lateral do veículo (Figura 4.1). O INSHORE efectua uma cobertura da praia mais eficiente e precisa, permitindo a produção de modelos 3D do terreno (Modelo Digital de Terreno (MDT)) a partir dos quais é possível calcular volumes e outros parâmetros após interpolação.

No decurso da presente dissertação, foram realizadas um total de 3 campanhas, Outubro de 2013, Fevereiro e Abril de 2014, que compreenderam o sector litoral da Barra à Praia de Mira (Figura 3.12). A aquisição dos dados topográficos fez-se, sempre que possível, em altura de baixa-mar de marés vivas de forma a cobrir a maior área possível. Com o veículo de todo-o-terreno percorreu-se a área a analisar, delineando perfis longitudinais e transversais para construir uma grelha do terreno, cujo limite superior foi a base da duna, do dique arenoso existente ou das frentes urbanas presentes, e o limite inferior foi a linha de água.



(a)



(b)

Figura 4.1: Sistema de GPS utilizado nas campanhas para aquisição de dados: (a) estação de referência e (b) veículo de todo-o-terreno com o sistema de aquisição instalado.

### **Campanha de Outubro de 2013**

A primeira campanha foi realizada no final do Verão marítimo, entre os dias 7 e 10 de Outubro de 2013. As praias apresentavam, em geral, um perfil com características reflectivas, com bermas e sistemas de lomba - canal em algumas praias; especialmente a Norte dos esporões, as praias eram relativamente largas (Figura 4.2).

### **Campanha de Fevereiro de 2014**

A segunda campanha foi concretizada entre 1 e 3 de Fevereiro de 2014, durante o Inverno marítimo. Desde meados de Dezembro que a costa portuguesa era atingida por temporais e um, especialmente severo, de 3 a 6 de Janeiro, associado à passagem da tempestade *Hercules* (Figura 4.3). Tendo em conta estas ocorrências as praias apresentavam um perfil dissipativo e em muitos casos estava presente uma arriba talhada na duna devido à forte agitação marítima que se observava.



Figura 4.2: Estado da praia do Areão a barlamar do esporão, no dia 9 de Outubro de 2013.



Figura 4.3: Praia da Barra a 6 de Janeiro de 2014 durante a tempestade *Hercules* (cedida por *Tribo do Sol*).

### Campanha de Abril de 2014

A última campanha foi realizada de 14 a 17 de Abril de 2014, correspondendo ao final do Inverno marítimo e após os severos temporais que caracterizaram este Inverno. Entre a campanha realizada em Fevereiro e a de Abril ocorreram outros eventos de temporal. Eram visíveis estragos avultados nas estruturas de defesa dunar e de acesso à praia e que se foram degradando ao longo de todo o Inverno, em particular no segmento entre a Barra e a Costa Nova (Figuras 4.4 e 4.5).



Figura 4.4: Estragos nas estruturas de protecção dunar após os temporais de Inverno de 2014 na praia da Barra (cedida por *Tribo do Sol*).



Figura 4.5: Estado do mar a 28 de Fevereiro de 2014 a Sul da praia da Barra (cedida por *Tribo do Sol*).

#### 4.1.2 Dados Topo-Batimétricos

Em relação à informação da praia imersa foram utilizados dados de batimetria e topobatimetria. Os dados batimétricos foram obtidos em Março de 2012 e Julho de 2013 e abrangem a praia submersa entre a Vagueira e a Praia de Mira; os perfis têm um espaçamento de

500.0 m e atingem profundidades médias de - 15.0 m. Os dados de topo-batimetria, cedidos pela APA, S.A., são de Setembro de 2009 e Outubro/Novembro de 2012, compreendem o sector BV e referem-se a 10 perfis transversais à praia, espaçados 1.0 km entre si, atingindo uma profundidade média até -15.0 m.

Os dados batimétricos foram associados aos topográficos do ano correspondente para quando se procedesse à interpolação de dados fosse "estimado" o comportamento do perfil de praia até ao nmm. Foram eliminados os dados onde não havia informação em comum entre a praia emersa e submersa. A conjugação de dados permitiu a obtenção de dois conjuntos de dados topo-batimétricos da Vagueira ao Areão e do Poço da Cruz à Praia de Mira, para os anos 2012 e 2013.

### 4.1.3 Dados de Agitação Marítima

Foram utilizados dois conjuntos de dados, o primeiro corresponde aos dados medidos por uma bóia ondógrafo, enquanto o segundo conjunto são dados simulados por modelos numéricos. As duas séries contêm valores relativos à  $H_s$ , ao  $T_m$ , ao  $T_p$  e à DirM. A utilização de uma série de dados simulada visa colmatar lacunas presentes nas séries de dados registados pelas bóias ondógrafo. Este procedimento implicou, previamente, uma validação dos mesmos, que será descrita na Secção 4.5.

Os dados medidos são provenientes da bóia ondógrafo de Leixões (Instituto Hidrográfico) e contemplam o período de 1 de Janeiro de 1995 até dia 31 de Março de 2014, com a excepção do ano de 2012 em que não foram adquiridos dados. A aquisição dos dados é efectuada de 3h em 3h (0:00 h, 3:00 h, 6:00 h, 9:00 h, 12:00 h, 15:00 h, 18:00 h e 21:00 h do dia), a data é referida à hora local. A série contém 38237 pontos mas apresenta lacunas significativas.

Os dados simulados correspondem ao ponto mais próximo da bóia de Leixões e são provenientes dos modelos numéricos HIRLAM e WAM, operados no Instituto Nacional de Meteorologia de Espanha. O modelo HIRLAM é um modelo atmosférico de escala sinóptica com uma resolução espacial média de 15 km. O modelo produz resultados a cada 3h, mas estes representam médias horárias. Por outro lado, o modelo WAM é um modelo de ondas de terceira geração, que pode ser usado à escala regional ou global, tanto para águas profundas como pouco profundas. Apresenta uma resolução média de 30 km para o Oceano Atlântico e de 15 km para o Mediterrâneo (Soares, 2008). O intervalo de dados engloba o período de 22 de Outubro de 1995 a 31 de Julho de 2014. O *output* dos dados é inicialmente de 3 h, no entanto, a partir do dia 14 de Outubro de 2008 passa a ser horário. No entanto, a série simulada também apresenta lacunas, que podem ir até 20 dias sem informação. O número de pontos presentes neste conjunto é de 85204.

## 4.2 Validação dos dados topo-batimétricos

O conjunto de dados topo-batimétricos provenientes da APA, S.A. apresentavam diferenças em relação aos dados topográficos adquiridos pela UA. Embora tendo em conta o desfasamento temporal entre as duas fontes de dados (APA, S.A. e UA) verificou-se que em termos de altimetria existia um desfasamento de cotas muito significativo em locais da praia que são menos sensíveis à actuação da agitação marítima.

De modo a calcular o desvio entre os dois conjuntos de dados escolheram-se pontos o mais coincidentes possível, junto à base da duna (onde, em teoria, se verifica menor variação de cota) e determinou-se a diferença entre ambos. Este processo foi realizado para dois grupos

de dados, os dados topo-batimétricos de 2009 com os topográficos de 2008 e os dados topo-batimétricos de 2012 com os topográficos de 2013, uma vez que o sector com dados topográficos de 2012 não é coincidente com a localização da informação topo-batimétrica (Tabela 4.2).

Tabela 4.2: Cotas registadas para cada conjunto de dados, sendo APA os dados topo-batimétricos e UA os dados topográficos, e a diferença de cotas entre os dois conjuntos.

Perfil	APA 2009 Cota (m)	UA 2008 Cota (m)	$\Delta$ Cota (m)	APA 2012 Cota (m)	UA 2013 Cota (m)	$\Delta$ Cota (m)
1	-	-	-	9.6	7.5	2.1
2	-	-	-	8.5	5.7	2.8
3	-	-	-	8.1	6.1	2.0
4	-	-	-	11.2	8.7	2.6
5	7.6	5.1	2.5	7.4	5.1	2.4
6	7.5	4.7	2.8	6.9	5.3	1.6
7	7.8	5.6	2.2	6.9	4.3	2.6
8	7.0	4.8	2.2	7.5	4.5	3.0
9	7.3	4.9	2.4	7.0	4.2	2.9
10	-	-	-	6.8	3.5	3.3

Após observados os resultados, verificou-se que as diferenças encontradas dificilmente seriam devidas, apenas, à dinâmica litoral, muito possivelmente, seriam, também, devidas à utilização de datums altimétricos distintos. Pelo que, de modo a colmatar essa diferença e promover uma análise consistente de toda a informação utilizada, considerou-se uma translação de 2 m nos dados da APA, S.A. (Figura 4.6).

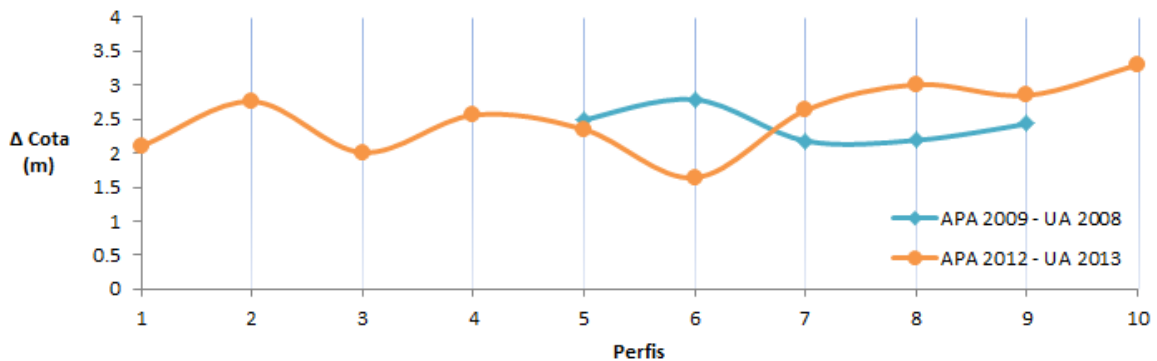


Figura 4.6: Gráfico da diferença de cotas entre as duas fontes de dados.

### 4.3 Modelo Digital do Terreno

Após a preparação dos dados de campo recorreu-se ao *software ArcGis* para gerar modelos 3D do terreno a partir dos perfis longitudinais e transversais. A modelação do relevo do terreno realizou-se através de um modelo vectorial, tendo como base uma rede irregular de triângulos (*Triangulated Irregular Network* (TIN)). A representação digital do relevo cor-



responde à criação de um conjunto de superfícies de faces triangulares planas e a superfície gerada denomina-se por modelo digital do terreno (MDT) (Esri, 2012) (Figura 4.7).

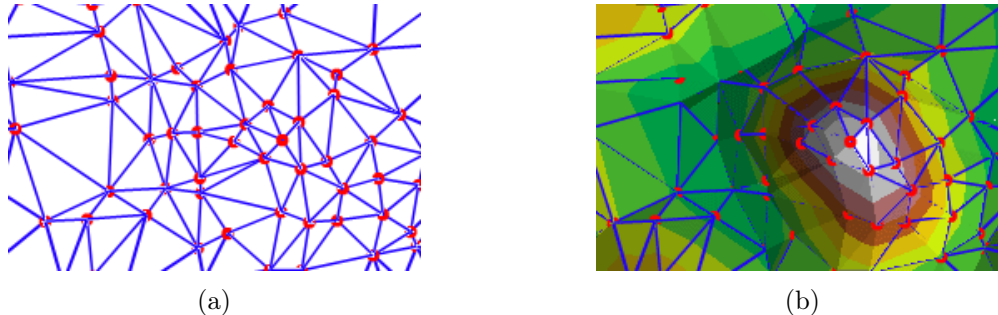


Figura 4.7: Processo de interpolação a partir de uma rede irregular de triângulos (Esri, 2012).

Foram adicionados ao ArcMap os dados de topografia, criando *feature classes* de pontos. Após os dados inseridos delimitou-se as grelhas utilizando uma *shapefile* de polígonos para posteriormente delimitar a TIN (Figura 4.8).

Para construir o MDT utilizou-se a extensão ArcToolbox do ArcGis, que disponibiliza as funcionalidades de geoprocessamento. Na área *3D Analyst Tools* criou-se a TIN. Após a criação desta, para cada sector e para cada ano de dados, houve a necessidade de recortar a TIN pelo limite da grelha de dados para eliminar as extrapolações fora da área abrangida pelo levantamento topográfico em campo. Para cada *shapefile* aplicou-se uma ferramenta (*Interpolate shape*) que converte uma *feature class* em 2D, neste caso de polígonos, numa *feature class* em 3D, interpolando os valores da altitude de uma superfície de entrada, neste caso, uma TIN (Esri, 2012). Quando se procede à delimitação do MDT com a *feature* criada neste processo a variação de relevo entre triângulos é mais suave do que com a *feature class* 2D. Na Figura 4.9 é possível observar o aspecto da TIN antes e depois de ser recortada.

O procedimento foi repetido para cada conjunto dos dados topográficos. Para os dados topo-batimétricos a metodologia difere no polígono delimitador. Construiu-se (a partir de uma ferramenta disponível no *ArcMap*) um polígono que correspondesse à área resultante da intersecção das duas grelhas de anos diferentes e para o mesmo sector. Este processo faz com que apenas seja considerado, para o cálculo de volumes, a área comum entre os conjuntos de cada ano. Além disso, uma cópia de cada polígono foi cortada pela cota de zero metros para, posteriormente, servir de limite superior no cálculo de volumes da praia submersa.

Para realizar mapas representativos da erosão e acreção sedimentar em períodos consecutivos de amostragem, transformou-se cada MDT num ficheiro *raster*. Um ficheiro *raster* está organizado em uma ou mais bandas e cada banda é constituída por uma matriz de pixéis e para cada um está associado um valor.

Com o objectivo de uma melhor percepção da zona e representação visual, os MDT foram sobrepostos a fotografias aéreas de 2010, à escala 1/28000 georreferenciadas. Na produção dos *layouts* dos MDT, procedeu-se a uma rotação da grelha de coordenadas de 14° para W, de modo a poder visualizar melhor cada sector, permitindo uma melhor manipulação dos mapas, em termos de escala, e de ajustamento nos *layouts* finais.



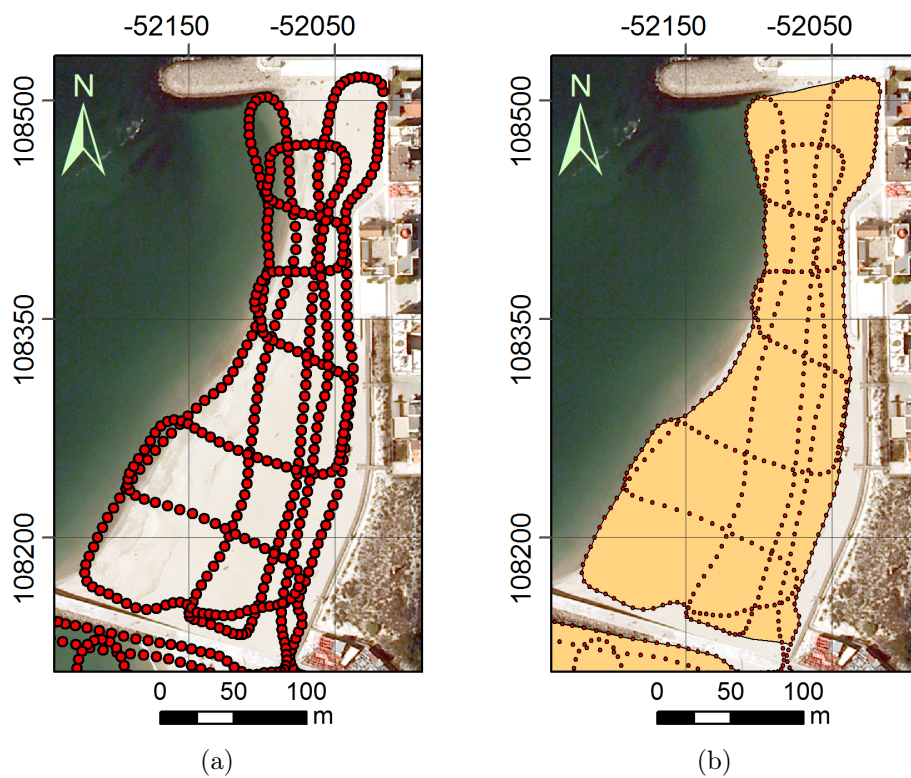


Figura 4.8: Aspecto dos dados topográficos inseridos no *ArcGis*: (a) grelha de pontos e (b) polígono delimitador da TIN.

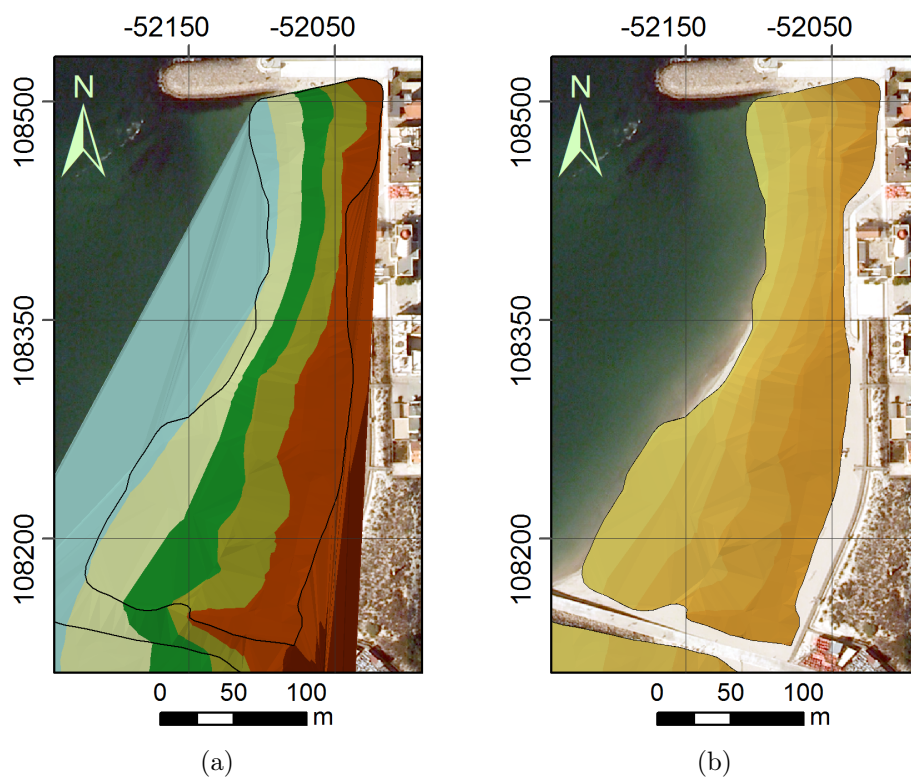


Figura 4.9: Aspecto original da TIN (a) com o polígono delimitador sobreposto (contorno a preto) e (b) TIN depois de ser recortada.

## 4.4 Volumes

O cálculo dos volumes da praia emersa foi realizado para células com extensão de 100 m. A divisão foi feita sobre as TINs criando uma *shapefile* de linhas perpendiculares à costa e paralelas entre si. Esta divisão teve início a Norte e a Sul de cada sector para o que restasse ficasse no centro (divisão com 100 m ou menos), zona que, em princípio, sofre menos alterações.

A ferramenta utilizada, *Polygon Volume*, calcula o volume e a área da superfície entre um polígono e a superfície da TIN. Os cálculos só são feitos para as zonas sobrepostas entre o polígono e a superfície do terreno. O volume é determinado entre a superfície topográfica e um plano horizontal definido pelo utilizador (Esri, 2012). Neste trabalho foi considerado para o limite inferior de cálculo, relativo à praia emersa, a cota de 0.0 m, ou seja, o nmm.

Para os dados topo-batimétricos a abordagem foi diferente; calculou-se separadamente o volume correspondente à praia emersa e à submersa, sendo a cota de referência o nmm. No cálculo de volume da praia submersa considerou-se o nível mínimo a cota de -15.0 m, correspondente à profundidade média de fecho, e o limite máximo à cota 0.0 m. Neste caso não houve divisão dos polígonos em células.

## 4.5 Validação dos Dados de Agitação Marítima

Esta secção descreve a metodologia aplicada à validação dos dados simulados. O primeiro passo para proceder à validação da informação foi criar uma matriz que agregasse os dados temporalmente comuns entre os medidos pela bóia e os simulados (designados por *Meas* e *Simul*, respectivamente). Os momentos que não eram comuns às duas séries foram apagados desta matriz para o número de pontos ser o mesmo (35619 pontos) e tornar mais correcta a comparação entre os dois conjuntos. O período de análise estende-se de 17 de Julho de 1996 a 31 de Março de 2014.

A comparação dos dois conjuntos para cada parâmetro (altura significativa ( $H_s$ ), período médio ( $T_m$ ), período de pico ( $T_p$ ) e direcção média (DirM)) revelou algumas anomalias que foram eliminadas como, por exemplo, valores de zero para  $H_s$ , períodos,  $T_m$  e  $T_p$ , inferiores a 2 s e DirM negativas. Obteve-se, então, uma matriz com 35113 pontos cujas séries são apresentadas na Figura 4.10, a qual permitiu analisar o comportamento da série simulada, relativamente à série medida, para os parâmetros  $H_s$ ,  $T_m$  e  $T_p$ .

Os dados correspondentes à DirM foram projectados numa rosa de rumos, de modo a avaliar a direcção predominante da ondulação e o desvio entre os dados medidos e simulados. As rosas apresentam as alturas significativas mais frequentes para cada ponto subcolateral e a direcção dominante da ondulação, para os dois conjuntos de dados (Figura 4.11). Nota-se uma predominância de rumos de NW para os dados medidos e um desvio para W nos dados simulados. As  $H_s$  inferiores a 3 m são as mais frequentes para todos os rumos apresentados. Predomina a direcção de NW com quase 45 % do total de registos e de WNW com 30 % para a série registada pela bóia. Para a série simulada perto de 40 % dos registos têm procedência de WNW, 30 % de NW e mais de 15 % de W.

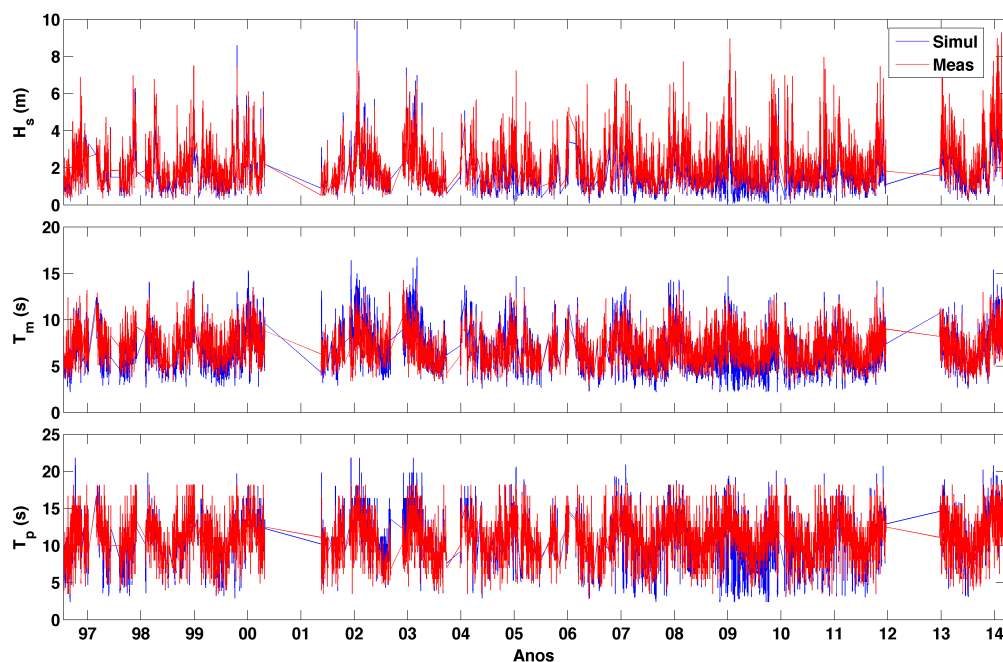


Figura 4.10: Séries de dados medidos e simulados considerando informação comum a ambas as séries.

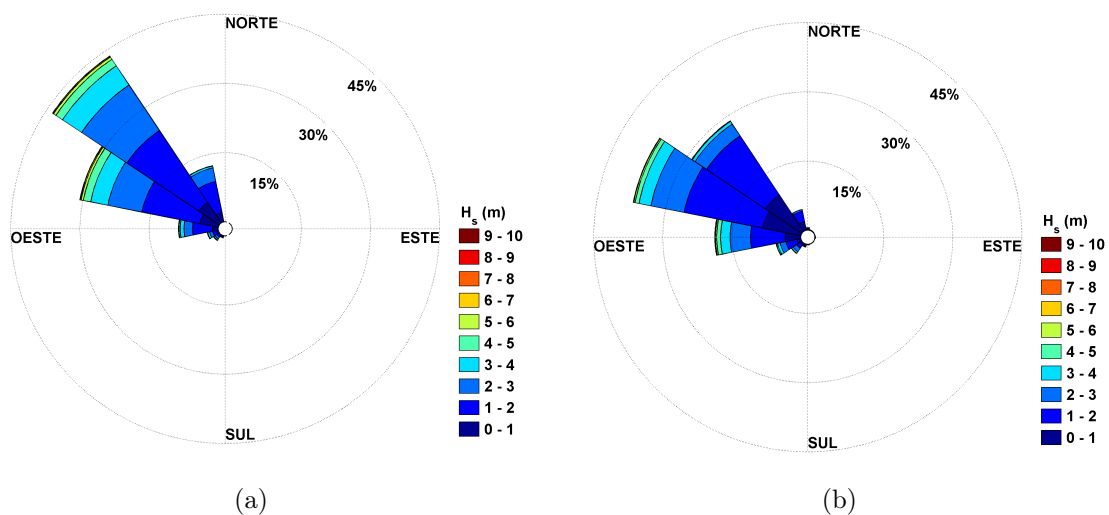


Figura 4.11: Rosa de rumos da direcção média de procedência da ondulação (DirM) (a) série obtida a partir dos dados da bóia ondógrafo e (b) série simulada.

### 4.5.1 Análise Estatística

A comparação entre os resultados obtidos pelo modelo e os dados da bóia foi realizada recorrendo aos parâmetros estatísticos mais comuns neste tipo de estudos:

- *SKILL* quantifica a precisão de modelos numéricos, fornecendo a correlação entre os valores simulados e os dados medidos. Para valores de *SKILL* próximos de 1 significa que os dados simulados estão bem ajustados aos medidos; quanto mais afastado de 1, pior é o ajuste entre as duas séries (Warner, 2005). Este parâmetro é calculado através da seguinte equação:

$$SKILL = 1 - \frac{\sum |Y_i - X_i|^2}{\sum (|Y_i - \bar{X}| + |X_i - \bar{X}|)^2} \quad (4.1)$$

- Média ( $\bar{X}$ ), determinada a partir da seguinte forma:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (4.2)$$

- Desvio padrão ( $\sigma$ ), mede a variabilidade dos valores em torno da média. O valor mínimo possível é  $\sigma = 0$ , indicando que não há variabilidade, ou seja, todos os valores são iguais à média. A equação que define este parâmetro é:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (4.3)$$

- Erro Médio Quadrático (*Root Mean Square* (RMS)), avalia a diferença entre uma série de dados estimados ou simulados e a série correspondente medida. O RMS mede a média do quadrado do erro, sendo o resultado o valor que a série simulada difere da série medida. O RMS é melhor quanto mais próximo de zero estiver e é definido por:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (4.4)$$

- *Bias* (B), mostra a tendência de um conjunto de dados simulados, relativamente a outros medidos. Um valor elevado de *Bias* significa uma tendência consistente na previsão (sub- ou sobreestima), enquanto um valor pequeno indica um comportamento aleatório ou dispersivo (Berg, 2008). O *Bias* calcula-se pela seguinte equação:

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)}{n} \quad (4.5)$$

Onde  $n$  é o número total de registos,  $X_i$  corresponde às medições da bóia e  $Y_i$  aos resultados obtidos a partir do modelo WAM. O número de pontos,  $n$ , utilizado nesta análise é de 35113.

Na Tabela 4.3 são apresentados os resultados estatísticos. O valor de *SKILL* obtido na correlação entre os dois conjuntos para  $H_s$  e os períodos,  $T_m$  e  $T_p$  é aceitável; no entanto, 0.62 para a direcção é um valor considerado baixo. A média de  $H_s$  e DirM que se obteve

na simulação difere, respectivamente, 0.41 m e 13.61° abaixo do registo da bóia, enquanto os períodos estão relativamente próximos. O desvio padrão de 2.20 e 2.55 quantifica alguma dispersão para os valores de  $T_m$  e  $T_p$  e o mesmo se observa para a direcção, enquanto para  $H_s$ , 0.97, quantifica uma dispersão aceitável. O RMS é considerado alto para os quatro parâmetros, tendo em conta a ordem de grandeza e os valores de média e desvio padrão observados. Quanto ao Bias, este é baixo para  $H_s$ ,  $T_m$  e  $T_p$  mas é alto para DirM, com um valor de 13.60. Em geral, para  $H_s$ ,  $T_m$  e  $T_p$  os resultados caracterizam-se por ser estatisticamente válidos. Porém, para a direcção, os dados simulados apresentam algumas inconsistências comparativamente aos registados pela bóia.

Tabela 4.3: Resultados estatísticos entre os dados medidos e simulados.

	SKILL	Média		Desvio Padrão		RMS	Bias
		Meas	Simul	Meas	Simul		
$H_s$ (m)	0.90	2.03	1.62	1.08	0.97	0.65	0.41
$T_m$ (s)	0.85	6.88	6.77	1.70	2.20	1.45	0.11
$T_p$ (s)	0.83	10.89	10.83	2.54	2.88	2.13	0.06
$DirM$ (°)	0.62	302.77	289.16	25.66	35.64	36.11	13.60

Comparou-se, de seguida, os resultados obtidos com os de outros autores. Por exemplo, Bento *et al.* (2009) compararam os resultados do modelo de terceira geração SWAN, associado ao modelo WAM, com os dados da bóia de Leixões. O trabalho de Pilar *et al.* (2008) descreve a previsão do clima de agitação marítima desenvolvida pelo modelo WAM para o período de 1958 a 2001, no Atlântico Norte. Os resultados foram comparados com dados medidos por várias bóias ao longo da área considerada. A bóia utilizada por Pilar *et al.* (2008), mais próxima de Leixões, situa-se na Figueira da Foz, a qual é usada para comparar com os dados considerados nesta dissertação.

Os autores de ambos os trabalhos consideram que os resultados são viáveis, havendo um ajuste aceitável entre os dados simulados e os registados pelas bóias, sendo possível utilizar os modelos para previsão do clima de agitação marítima (Tabela 4.4).

Tabela 4.4: Análise estatística para validação de dados simulados com dados medidos por bóias.

	Local	n	Média		RMS	Bias	Fonte
			Meas	Simul			
$H_s$ (m)	Fig. da Foz	5934	2.09	2.51	0.73	-0.43	Pilar <i>et al.</i> (2008)
$T_m$ (s)			7.28	7.62	1.41	-0.35	
$H_s$ (m)	Leixões	87	1.33	1.43	0.38	-0.11	Bento <i>et al.</i> (2009)
$T_m$ (s)			6.35	6.50	1.11	-0.15	

Comparando os resultados estatísticos obtidos neste trabalho com os apresentados pelos autores referidos, considera-se que os valores de RMS e as diferenças entre as médias, para os restantes parâmetros são próximos dos resultados de Pilar *et al.* (2008). Quanto ao Bias, nos trabalhos citados os registos dos modelos sobrestimam os dados medidos, enquanto na presente análise o modelo tende a subestimar os dados da bóia. Pela comparação feita com os trabalhos de Pilar *et al.* (2008) e Bento *et al.* (2009), os parâmetros conferidos poderiam ser considerados validados; no entanto, existem algumas discordâncias que devem ser melhor

analisadas.

Feita a análise estatística, põem-se a questão se as diferenças observadas entre os dois conjuntos estariam relacionadas com os registos médios de agitação ou com os eventos de temporal. Nesse sentido, procedeu-se a uma análise onde se dividiu as séries nos dois regimes de registos, com base nos critérios definidos.

#### 4.5.2 Definição de Eventos de Temporal

Quando se parte para a definição de eventos de temporal são vários os critérios adoptados. Trabalhos anteriores, para diferentes condições de agitação marítima, adoptam limiares de altura significativa não suportados por variáveis estatísticas da própria série que é estudada. Por exemplo,  $H_s > 4.00 \text{ m}$  (Lemm *et al.*, 1999),  $H_s > 1.50 \text{ m}$  (Dolan & Davis, 1992),  $H_s > 5.00 \text{ m}$  (Ferreira, 2005),  $H_s > 0.75 \text{ m}$  (Dorsch *et al.*, 2008). Nesta análise foram considerados os critérios de Li *et al.* (2009) e de Almeida *et al.* (2011). Segundo os autores, para uma sequência de dados ser considerada um evento de temporal, três critérios têm de se verificar:

- Um evento consiste em pelo menos um registo acima do limiar de temporal, que corresponde à média da série temporal mais dois desvios padrão ( $H_{s_{pico}} = \bar{H}_s + 2\sigma$ ). O evento continua enquanto a altura significativa permanecer acima da média da série temporal mais um desvio padrão ( $H_{s_{dur}} = \bar{H}_s + \sigma$ );
- O intervalo entre dois temporais consecutivos (intervalo entre picos) não é inferior a 30 horas, caso contrário, são considerados o mesmo evento;
- A "quebra" do temporal, do fim do anterior ao início do seguinte não é menor do que 3h, caso contrário, são considerados como a continuação do temporal anterior.

Aplicados os critérios à série registada pela bóia foram quantificados o número de eventos de temporal (Tabela 4.5) e o número de registos (Tabela 4.6) durante os eventos para cada mês do período em análise. Os anos 2009 e 2013 são os que registaram maior número de eventos de temporal, com 21 e 20 eventos, respectivamente; 2013 também registou maior número de registos (386), seguido do ano 2014 que com apenas 3 meses de informação obteve 328 registos (cada registo corresponde a 3h). Na contagem dos eventos observou-se falhas de dados consideradas importantes que impossibilitaram determinar se ocorreram temporais no período em falta ou se dois eventos consecutivos poderiam ser considerados o mesmo ou, ainda, se eram, de facto, eventos distintos.

De seguida, procedeu-se à análise estatística comparativa das sub-séries, considerando os registos médios e os registos de temporal (com base no *threshold* previamente definido para a série medida). Esta análise foi efectuada em ambas as séries (medida e simulada) obtendo-se os resultados apresentados nas Tabelas 4.7 e 4.8. Esperava-se que os resultados para os registos médios fossem melhores, comparativamente aos registos de temporal, o que se verificou para a altura significativa, para o período médio e para o período de pico. Porém, para a direcção, a correlação entre a série medida e a série simulada é melhor em registos de temporal relativamente aos registos médios.

Aplicando os critérios à série registada pela bóia de Leixões obteve-se  $H_{s_{pico}} = 4.18 \text{ m}$  e  $H_{s_{dur}} = 3.10 \text{ m}$ . Estes valores foram considerados como os limites (*thresholds*) em relação aos quais se pode analisar o comportamento das séries medidas e simuladas (Figura 4.12). Na

Tabela 4.5: Número de eventos de temporal observados no período em análise, para a série medida na bóia de Leixões.

Ano	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	$\Sigma$
1996	-	-	-	-	-	-	0	0	2	0	2	1	5
1997	0	-	0	0	1	0	-	0	0	0	4	0	5
1998	-	0	0	4	0	0	0	0	1	0	2	2	9
1999	0	1	1	1	0	0	0	0	2	2	0	3	10
2000	2	3	0	2	-	-	-	-	-	-	-	-	7
2001	-	-	-	-	0	0	0	0	0	2	-	0	2
2002	3	2	3	0	2	0	0	0	0	-	-	3	13
2003	3	4	1	1	0	1	0	0	0	-	-	-	10
2004	2	1	2	2	0	0	0	0	0	3	0	4	14
2005	3	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	7
2006	3	-	4	1	1	0	0	0	1	2	3	2	17
2007	3	3	2	0	2	0	0	0	0	0	0	3	13
2008	2	1	3	2	0	0	0	1	1	1	3	3	17
2009	4	2	1	0	1	1	0	0	0	1	5	6	21
2010	-	4	2	1	0	0	0	0	0	4	4	0	15
2011	2	3	0	2	0	0	0	0	0	2	5	2	16
2012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2013	4	3	3	2	0	1	0	0	0	2	2	3	20
2014	2	4	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8
$\Sigma$	33	31	25	15	7	3	0	1	8	20	30	32	205

Tabela 4.6: Número de registos em eventos de temporal no período em análise, para a série medida na bóia de Leixões.

Ano	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	$\Sigma$
1996	-	-	-	-	-	-	0	0	7	0	32	6	45
1997	0	-	0	0	3	0	-	0	0	0	111	0	114
1998	-	0	0	42	0	0	0	0	12	0	20	48	122
1999	34	10	22	9	0	0	0	0	31	39	0	44	189
2000	26	19	0	19	-	-	-	-	-	-	-	-	64
2001	-	-	-	-	0	0	0	0	0	19	-	0	19
2002	97	48	35	0	19	0	0	0	0	-	-	38	237
2003	75	40	33	5	0	2	2	0	0	-	-	-	157
2004	39	10	23	14	0	0	0	0	0	22	0	35	143
2005	31	0	18	7	0	0	0	0	8	8	0	0	72
2006	32	-	47	5	6	0	0	0	13	14	44	44	205
2007	23	64	34	0	21	0	0	0	0	0	0	30	172
2008	78	13	45	26	0	0	0	6	10	5	23	37	243
2009	56	29	14	0	3	3	0	0	0	13	98	61	277
2010	-	48	18	5	0	0	0	0	0	49	36	0	156
2011	23	64	0	10	0	0	0	0	0	37	57	43	234
2012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2013	66	30	82	18	0	4	0	0	0	36	51	99	386
2014	121	169	38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	328
$\Sigma$	701	544	409	160	52	9	2	6	81	242	472	485	3121

Tabela 4.7: Resultados estatísticos para registos médios,  $H_s < H_{spico}$ , onde  $n$  corresponde a 33466 pontos.

	Skill	Média		Desvio Padrão		RMS	Bias
		Meas	Simul	Meas	Simul		
$H_s$ (m)	0.87	1.88	1.49	0.84	0.78	0.60	0.39
$T_m$ (s)	0.84	6.76	6.63	1.63	2.11	1.46	0.13
$T_p$ (s)	0.81	10.72	10.63	2.44	2.76	2.14	0.09
$DirM$ (°)	0.61	303.32	289.45	23.59	36.22	35.38	13.87

Tabela 4.8: Resultados estatísticos para registos de temporal,  $H_s \geq H_{spico}$ , onde  $n$  corresponde a 1647 pontos.

	Skill	Média		Desvio Padrão		RMS	Bias
		Meas	Simul	Meas	Simul		
$H_s$ (m)	0.60	5.04	4.11	0.84	1.07	1.30	0.92
$T_m$ (s)	0.79	9.31	9.58	1.30	2.09	1.49	-0.26
$T_p$ (s)	0.83	14.38	14.76	2.10	2.31	1.75	-0.38
$DirM$ (°)	0.75	299.41	283.74	18.11	20.05	20.62	15.67

Figura 4.12 são visíveis quatro picos. Para o primeiro caso, regista-se um evento de temporal, no entanto, se se fosse considerar a série simulada esse evento não existiria. Para os dois picos seguintes distinguem-se dois eventos, tanto para os dados medidos como para os dados simulados mas, para os dados medidos se estivesse apenas um registo abaixo de  $H_{sdur}$ , a linha azul clara, estes eram considerados como pertencentes ao mesmo evento, uma vez que o intervalo entre eventos tem de ser superior a 3h. Para o último pico regista-se um evento para os dados medidos, com duração de quase 3 dias, e nenhum para os dados simulados.

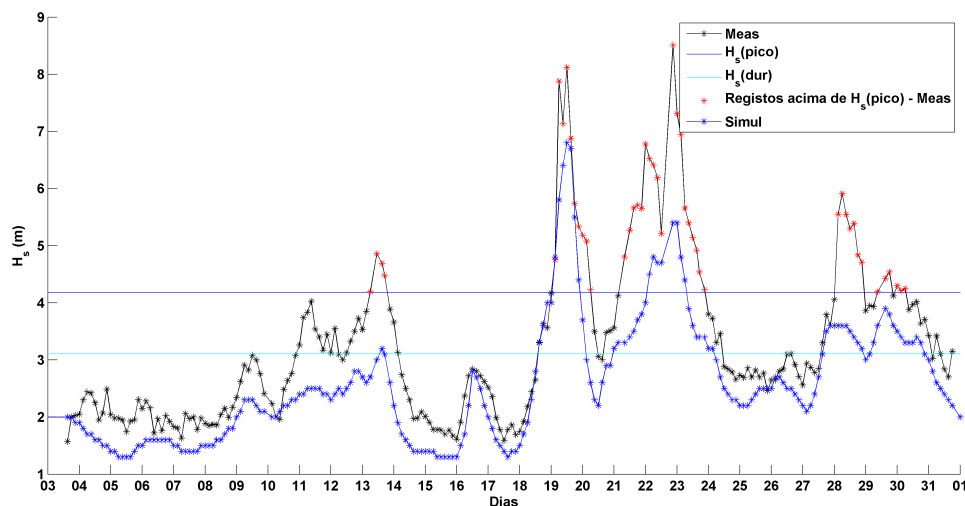


Figura 4.12: Gráfico da altura significativa com os critérios de definição de temporal aplicados à série registada pela bóia de Leixões no mês de Janeiro de 2013.



### 4.5.3 Correção dos Dados Simulados

Após a comparação dos registos de temporal entre as séries medidas pela bóia de Leixões e as simuladas, tentou-se melhorar o ajuste entre os dois conjuntos de dados, aplicando um factor de correcção ao conjunto simulado. Para isso, produziram-se os gráficos de dispersão para cada parâmetro da ondulação, representou-se a recta de ajuste para as duas séries e retirou-se a equação da recta (uma recta do tipo  $y=mx+b$ ) (Figura 4.13).

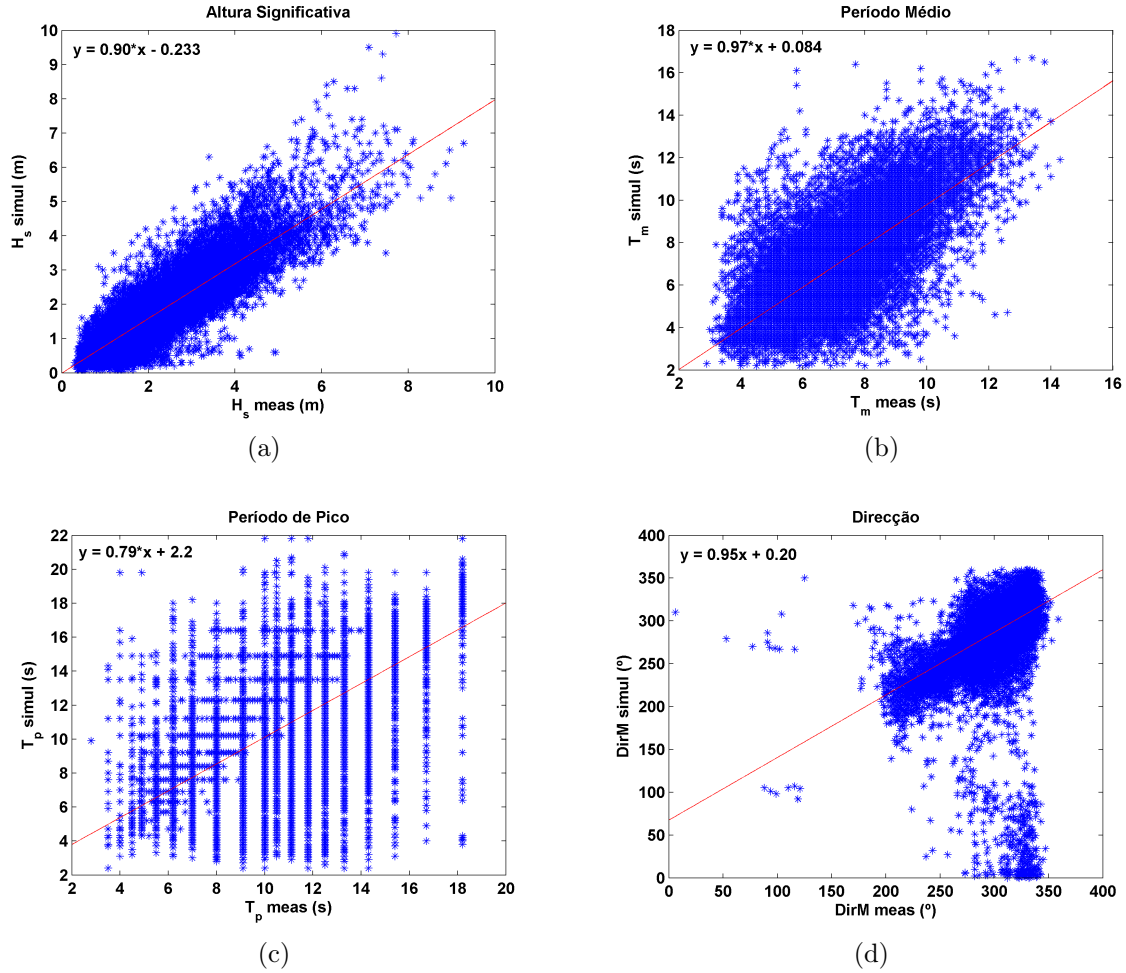


Figura 4.13: Gráficos de dispersão dos dados medidos e simulados.

A correcção da série simulada foi efectuada aplicando a equação da recta, ou seja, cada ponto da série simulada, que corresponde ao  $y$  na equação, foi dividido pelo declive ( $m$ ) e subtraído pela ordenada na origem ( $b$ ), obtendo-se  $x$ , o ponto corrigido ( $x = \frac{y}{m} - b$ ). Após este ajuste, realizou-se nova análise estatística para as séries completas, *Meas* e *Simul* corrigido, na qual se observou melhorias para os parâmetros  $H_s$  e *DirM* (Tabela 4.9). Para a direcção o *SKILL* aumentou muito pouco mas verificou-se melhorias nos outros parâmetros, nomeadamente, a média entre as duas séries está mais próxima e o RMS e o Bias estão mais baixos. Para  $H_s$  o *SKILL* obtido é bastante satisfatório, observando-se uma melhoria no ajuste das duas séries em todos os parâmetros da análise estatística. No entanto, para  $T_m$  e  $T_p$  não se verificou melhorias significativas, tendo-se preferido manter a série original.

Tabela 4.9: Resultados estatísticos entre os dados medidos e os dados simulados corrigidos.

	SKILL	Média		Desvio Padrão		RMS	Bias
		Meas	Simul	Meas	Simul		
$H_s$ (m)	0.94	2.03	2.03	1.07	1.08	0.52	0.01
$T_m$ (s)	0.85	6.88	6.77	1.70	2.20	1.46	0.11
$T_p$ (s)	0.83	10.89	10.82	2.54	2.87	2.13	0.06
$DirM$ (°)	0.64	303.14	304.20	23.37	37.52	33.39	-1.06

De seguida, projectaram-se os dados da direcção média de procedência numa rosa de rumos e observou-se uma maior proximidade com os dados medidos (Figura 4.14). O rumo dominante para a série simulada corresponde a NW com quase 40 % dos registos, sucedido pelo rumo de WNW com cerca de 25 % dos registos, contra os 45 % e os 30 %, respectivamente, dos dados medidos.

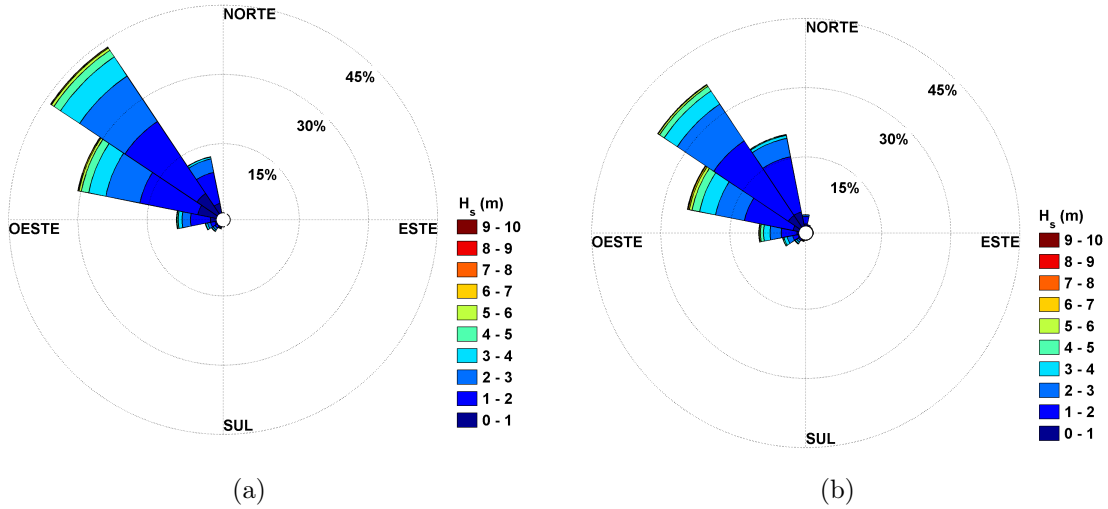


Figura 4.14: Rosa de rumos da direcção média de procedência da ondulação ( $DirM$ ) para a (a) série medida e (b) série simulada corrigida.

Aplicando os critérios de temporal à série ajustada obteve-se  $H_{s_{pico}} = 4.39$  m e  $H_{s_{dur}} = 3.24$  m. Quantificou-se o número de eventos de temporal e de registos para o período em análise, semelhante ao realizado para a série medida (Tabelas 4.10 e 4.11). Os anos em que se verificaram mais eventos de temporal foram 2003 e 2006 com 18 e 17 eventos, respectivamente; quanto ao número de registos, foram os anos 2000 e 2002 que obtiveram mais registos com 530 e 459, respectivamente. A não correspondência entre os números de eventos e de registos pode estar relacionada com a ocorrência de temporais persistentes, ou seja, apesar do número de eventos ser menor, estes tiveram maior duração.

Ao comparar estas duas tabelas com as 4.5 e 4.6 para os eventos medidos pela bóia, o primeiro aspecto que sobressai é o maior número de informação, ou seja, não existem as falhas que se observam nos dados medidos. A série simulada também apresenta lacunas, contudo, não são representativas das observadas em *Meas*. Ainda assim, a série simulada, também, apresenta situações nas quais não é possível identificar a individualidade ou persistência de temporais. Quanto ao número de eventos, apesar das falhas, na série *Meas* identificaram-se

mais eventos relativamente à série *Simul* mas, o número de registos, é superior nesta série, uma vez que apresenta mais informação.

Após esta análise considerou-se validada a série simulada corrigida, sendo possível utilizá-la para preencher as lacunas nos dados medidos. Contudo, é importante analisar os resultados com algum sentido crítico, uma vez que ainda existem algumas discordâncias entre os dois conjuntos e respectivos erros associados.

Sucedeu-se a criação de uma nova série temporal, onde se definiu o período de 1 de Janeiro de 2003 a 1 de Maio de 2014, que corresponde ao período dos dados topográficos, atendendo ao intervalo de 3h entre cada ponto. De seguida, adicionou-se a série *Meas* original e utilizou-se a série *Simul*, já validada, para preencher as lacunas de *Meas*. Esta nova série contém 32928 pontos e apenas 177 momentos sem informação. A nova matriz foi utilizada para proceder à caracterização do clima de agitação marítima para o período em estudo e perceber a relação entre os eventos ocorridos e as variações observadas em termos de variações morfológicas e volumétricas (acrecção e erosão) no troço costeiro em estudo.

Tabela 4.10: Número de eventos de temporal observados nos diferentes meses do período em análise, para a série simulada.

Ano	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	$\Sigma$
1995	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	1	1	2
1996	1	2	0	1	0	0	0	0	0	1	2	2	9
1997	1	3	0	0	0	1	0	0	0	0	4	2	11
1998	3	0	0	4	0	0	0	0	0	0	1	2	10
1999	3	1	1	1	0	0	0	0	1	2	0	2	11
2000	1	3	0	2	0	0	0	0	1	2	4	1	14
2001	4	1	4	1	0	0	0	0	0	2	0	1	13
2002	2	1	2	1	1	0	0	0	0	3	3	3	16
2003	3	4	1	1	0	1	0	1	0	1	5	1	18
2004	1	1	2	2	1	0	0	0	0	1	0	1	9
2005	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	4
2006	1	2	2	0	1	0	0	0	0	1	2	1	17
2007	1	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	3	8
2008	3	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	7
2009	2	2	1	0	0	0	0	0	0	1	4	5	15
2010	1	4	2	0	0	0	0	0	0	3	2	1	13
2011	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	6
2012	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	1	3	7
2013	3	3	3	1	0	0	0	0	0	1	0	2	13
2014	2	4	1	0	0	0	0	-	-	-	-	-	7
$\Sigma$	34	34	23	17	3	2	0	1	3	19	33	33	198

Tabela 4.11: Número de registos em eventos de temporal no período em análise, para a série simulada.

<b>Ano</b>	<b>J</b>	<b>F</b>	<b>M</b>	<b>A</b>	<b>M</b>	<b>J</b>	<b>J</b>	<b>A</b>	<b>S</b>	<b>O</b>	<b>N</b>	<b>D</b>	$\Sigma$
<b>1995</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	5	86	91
<b>1996</b>	103	26	0	10	0	0	0	0	0	11	33	53	236
<b>1997</b>	10	82	0	0	0	11	0	0	0	0	101	54	258
<b>1998</b>	98	0	0	43	0	0	0	0	0	0	7	53	201
<b>1999</b>	79	6	18	10	0	0	0	0	28	58	4	54	257
<b>2000</b>	36	74	0	57	0	0	0	0	14	38	86	225	530
<b>2001</b>	124	29	133	10	0	0	0	0	0	60	0	15	371
<b>2002</b>	115	79	57	13	16	0	0	0	0	23	84	72	459
<b>2003</b>	96	66	64	14	0	3	3	5	0	10	64	8	333
<b>2004</b>	55	41	49	53	10	0	0	0	0	9	0	10	227
<b>2005</b>	14	0	18	0	0	0	0	0	0	0	10	11	53
<b>2006</b>	9	48	46	0	8	0	0	0	0	4	51	50	216
<b>2007</b>	8	53	27	0	0	0	0	0	0	0	0	29	117
<b>2008</b>	64	0	14	20	0	0	0	0	0	0	14	13	125
<b>2009</b>	81	32	15	0	0	0	0	0	0	12	52	64	256
<b>2010</b>	27	49	17	0	0	0	0	0	0	28	21	10	152
<b>2011</b>	11	52	0	0	0	0	0	0	0	11	21	42	137
<b>2012</b>	0	0	0	19	0	0	0	0	5	0	4	46	74
<b>2013</b>	44	26	80	4	0	0	0	0	0	13	0	98	265
<b>2014</b>	111	140	17	0	0	0	0	-	-	-	-	-	268
$\Sigma$	1085	803	555	253	34	14	3	5	47	277	557	993	4626

## Capítulo 5

# Resultados e Discussão

Neste capítulo serão apresentados os resultados e será feita a análise e discussão dos mesmos. O capítulo divide-se em duas secções, em primeiro será feita uma caracterização da agitação marítima para o período de estudo e, de seguida, serão analisados os resultados dos dados topográficos e topo-batimétricos.

Na discussão dos resultados da evolução morfológica que envolveu o cálculo de balanços sedimentares pretende-se averiguar possíveis relações com eventos de temporal para justificar alguns dos episódios observados. Além disso, serão também confrontados os resultados com intervenções efectuadas nas praias, tomando como base informações relativas à deposição de dragados do porto de Aveiro.

### 5.1 Caracterização do Clima de Agitação Marítima

A caracterização do clima de agitação marítima baseia-se nos parâmetros altura significativa, período médio, período de pico e direcção média de procedência da ondulação. A metodologia seguida na caracterização do clima de agitação marítima foi adaptada da metodologia utilizada por Coelho (2005). Após esta análise geral será feito um levantamento dos eventos de temporal e as suas principais características.

#### 5.1.1 Rumos Dominantes

A informação relativa aos rumos da ondulação foram divididas em classes de  $22.5^\circ$  de amplitude, centrados na direcção que dá o nome à classe, como se verifica na Tabela 5.1. Para o período de 10 anos, o rumo com maior frequência de ocorrência é de NW com 43.07 % dos registos, seguido dos rumos WNW e NNW com cerca de 28 % e 15 % dos registos, respectivamente. Os rumos que menos ocorrem são de S e SSW com apenas 144 registos, que correspondem a 0.43 %. Existem 94 registos, que correspondem a 0.30 % que pertencem a rumos de NNE a SSE. No entanto, tendo a costa portuguesa uma orientação, aproximadamente, N-S e, também, porque a percentagem correspondente é muito pouco significativa não faz qualquer sentido inserir estes registos na análise da agitação marítima, pelo que serão ignorados daqui para a frente.

Analisando a distribuição mensal dos rumos verifica-se maior frequência nos rumos de NW, WNW e NNW (Figura 5.1). Os rumos de NW não apresentam nenhum padrão definido, apresentando elevada frequência de ocorrência para todos os meses. Para a ondulação

Tabela 5.1: Número de registos e frequência de ocorrência por rumos, para a direcção média de procedência da ondulação.

Rumo (°)	Nº de Registos	Frequência (%)
N	154	0.47
NNW	4892	14.86
NW	14182	43.07
WNW	9199	27.94
W	2855	8.67
WSW	925	2.81
SW	483	1.47
SSW	130	0.39
S	14	0.04
NNE - SSE	94	0.29
$\Sigma$	32928	100.00

de WNW observa-se que a maior frequência de ocorrências acontece nos meses de Inverno, sobretudo de Janeiro a Março e em Outubro e Dezembro. Para os rumos de W a S verifica-se, aproximadamente, o mesmo padrão. Apesar do número de registos ser mais baixo, nota-se o predomínio destas direcções nos meses de Inverno. A ondulação de NNW apresenta maior ocorrência nos meses de Verão, aumentando a partir de Abril, atinge maior ocorrência em Julho e Agosto decrescendo, novamente, a partir de Setembro. Esta situação representa as componentes geradas pelos ventos predominantes no Verão (ventos de N e NW).

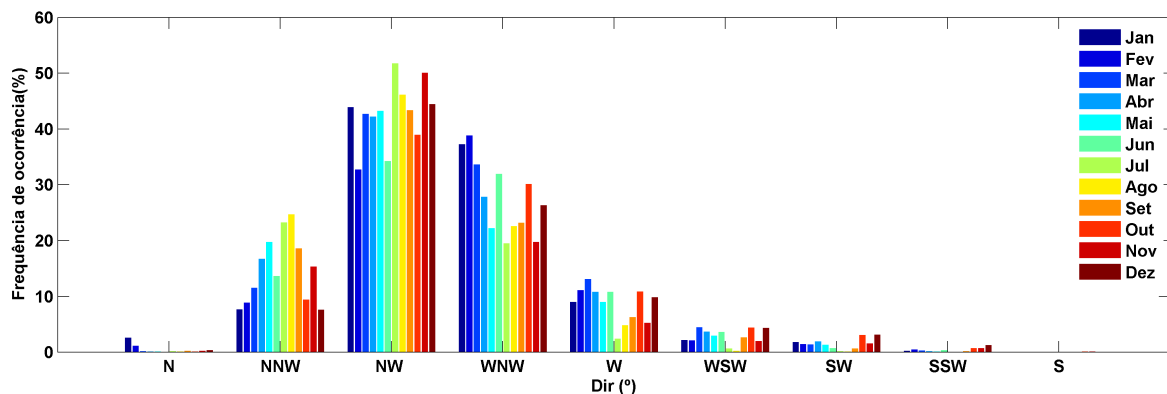


Figura 5.1: Distribuição mensal da direcção média de procedência da ondulação.

Estes resultados vão ao encontro dos valores obtidos por Coelho (2005) e apresentados na Subsecção 3.5.2. Segundo este autor, a predominância da ondulação também corresponde ao rumo NW com 42.4 % do total dos registos e ocorre, igualmente, em qualquer altura do ano. Em ambos os casos, os registos de W rondam os 10 %. Contudo, observa-se uma ligeira rotação da tendência de proveniência de rumos para N, identificada pelo aumento de 0.67% dos registos para o rumo NW e de 2.76% para NNW.

### 5.1.2 Alturas e Períodos de Onda

Na análise dos dados da altura significativa e dos períodos procedeu-se de forma semelhante ao efectuado com os rumos. Foram definidas classes de um metro e de um segundo para  $H_s$  e  $T_m$ , respectivamente. As classes definidas para  $H_s$  não seguem os critérios utilizados por Coelho (2005).

Pelos resultados apresentados na Tabela 5.2 as alturas entre 1 m e 2 m são as mais frequentes com 45 % dos registos totais, seguida da classe que compreende alturas entre 2 m e 3 m com um quarto dos registos. As alturas superiores a 8 m são as menos frequentes, com apenas 27 registos que correspondem a menos de 0.1 %.

Tabela 5.2: Número de registos e frequência de ocorrência por classes, para a altura significativa ( $H_s$ ).

$H_s(m)$	Nº de Registos	Frequência (%)
< 1	3839	11.66
1 - 2	14832	45.04
2 - 3	8398	25.50
3 - 4	3636	11.04
4 - 5	1476	4.48
5 - 6	435	1.33
6 - 7	212	0.65
7 - 8	73	0.22
8 - 9	17	0.05
9 - 10	6	0.02
> 10	4	0.01
$\Sigma$	32928	100.00

Quanto à distribuição da altura de onda significativa, apresentada na Figura 5.2, observa-se um padrão bem definido e a diferença entre os meses de Verão e de Inverno. A ondulação com alturas inferiores a 2 m ocorrem com maior frequência nos meses de Verão marítimo, de Maio a Setembro. Com o aumento da altura das ondas, a ocorrência destas torna-se insignificante nos meses de Verão, de Junho a Setembro, não havendo registos acima dos 5 m. Para os restantes meses, o número de registos aumenta a partir de Setembro na classe de 2 - 3 m e na classe de 3 - 4 m e a partir de Outubro nas classes superiores. Atingem o máximo de ocorrências nos meses de Dezembro e Janeiro, voltando a decrescer em Março. Para alturas superiores a 8 m torna-se pouco representativo os registos existentes.

Apesar das classes definidas nesta análise não corresponder às classes definidas por Coelho (2005) para  $H_s$ , é possível observar o mesmo padrão na distribuição mensal da altura de onda significativa.

No que diz respeito ao período médio são mais frequentes períodos entre 5 - 6 s com 23 % dos registos, seguido de períodos entre 6 - 7 s com 20 % das ocorrências totais. Os períodos acima de 12 s são os menos frequentes com 287 registos o que, corresponde a menos de 1 % do total de ocorrências (Tabela 5.3).

O padrão da distribuição mensal do período médio, ilustrada na Figura 5.3, é semelhante ao padrão observado para a altura de onda significativa. Períodos abaixo de 3 s são insignificantes e, apenas os meses de Julho e Agosto atingem frequências de ocorrência de 5 % para a classe 3 - 4 s. Nas classes de 4 - 5 s e de 5 - 6 s as ocorrências predominam nos meses de Verão, de

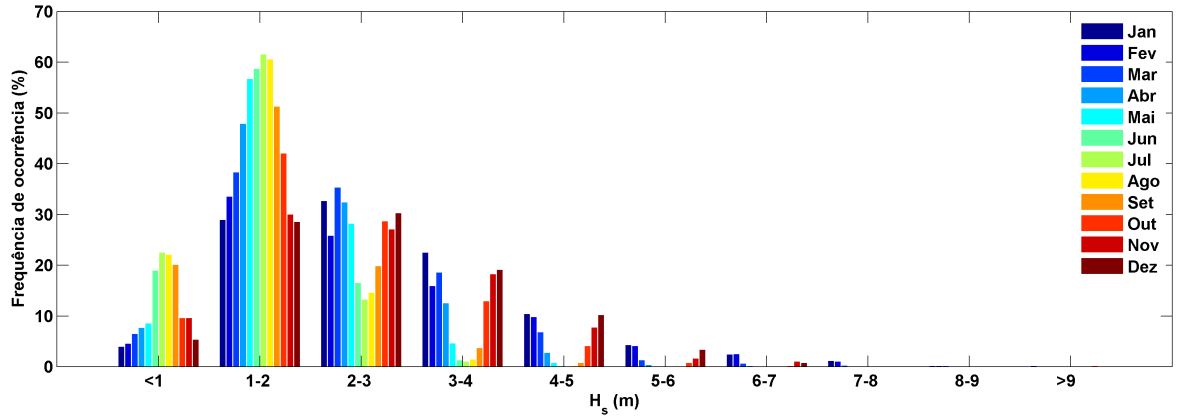


Figura 5.2: Distribuição mensal da altura de onda significativa.

Tabela 5.3: Número de registos e frequência de ocorrência por classes, para o período médio ( $T_m$ ).

$T_m(s)$	Nº de Registos	Frequência (%)
< 3	36	0.11
3 - 4	765	2.33
4 - 5	4618	14.02
5 - 6	7549	22.93
6 - 7	6745	20.48
7 - 8	5420	16.46
8 - 9	3832	11.64
9 - 10	2173	6.60
10 - 11	1006	3.05
11 - 12	497	1.21
12 - 13	179	0.54
13 - 14	62	0.19
> 14	46	0.14
$\Sigma$	32928	100.00

Maio a Agosto, atingindo cerca de 30 % dos registos. A partir dos 6 s as ocorrências para os meses de Verão vão diminuindo, aumentando nos meses de Inverno, no entanto, o número de registos face aos registos totais também diminui. Para períodos médios acima dos 10 s deixa de haver ocorrências para os meses de Junho a Agosto e, a partir dos 12 s, apenas há registos para os meses de Outubro a Março.

Comparando os resultados obtidos de  $T_m$  com os de Coelho (2005), existem algumas diferenças nas classes mais frequentes. Este considera que os períodos mais significativos situam-se entre os 8 - 10 s com cerca de 30.9 % das ocorrências. Enquanto as classes com mais significado no presente trabalho correspondem ao intervalo entre 5 - 7 s com 43.5 %, que corroboram os resultados de Capelo (2012) que obteve uma frequência de ocorrência 44.5 % para as mesmas classes para intervalo de 2001 a 2007. Estes resultados indicam uma diminuição do período médio da ondulação na última década.

O período de pico apresenta maiores ocorrências entre valores de 9 s e 10 s com 19.25 %



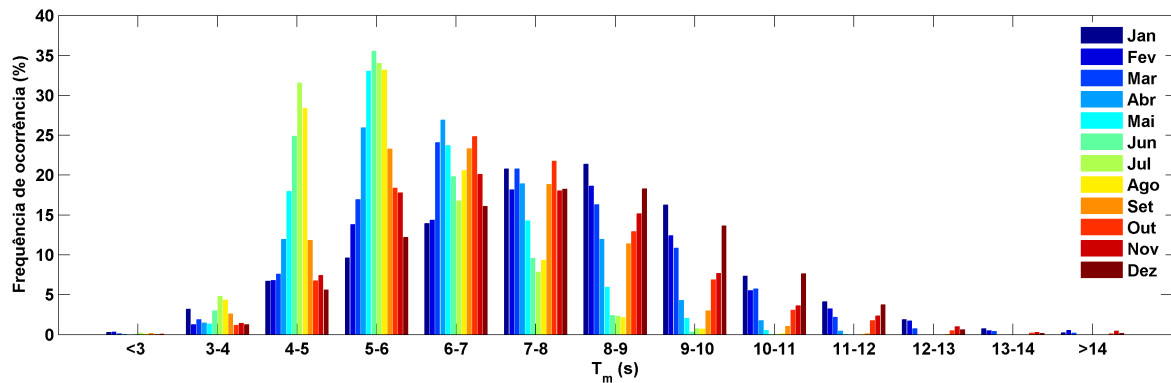


Figura 5.3: Distribuição mensal do período de onda médio.

dos registos totais, seguido de quase 19.00 % para a classe de 11 s a 12 s, a terceira classe mais representativa já contém apenas 11.66 % dos registos, quase 10.00 % de diferença das duas classes com mais significado. Com menos registos estão a classe de valores inferiores a 4 s e a classe 17 - 18 s (Tabela 5.4).

Tabela 5.4: Número de registos e frequência de ocorrência por classes, para o período de pico ( $T_p$ ).

$T_p(s)$	Nº de Registos	Frequência (%)
< 4	100	0.30
4 - 5	255	0.77
5 - 6	438	1.33
6 - 7	2301	6.99
7 - 8	2481	7.53
8 - 9	827	2.51
9 - 10	6340	19.25
10 - 11	3096	9.40
11 - 12	6248	18.97
12 - 13	3512	10.67
13 - 14	2993	9.09
14 - 15	2103	6.39
15 - 16	1173	3.56
16 - 17	672	2.04
17 - 18	160	0.49
> 18	229	0.69
$\sum$	32928	100.00

A distribuição mensal do período de pico tem um comportamento bem definido. As ocorrências abaixo dos 5 s têm pouco significado e, na classe de 5 - 6 s, apenas o mês Julho atinge 5 % das ocorrências. Os meses de Verão perdem sentido para períodos superiores a 12 s enquanto os meses de Inverno passam a ter importância para períodos acima de 9 s. A classe com maior frequência de ocorrência é o intervalo entre 9 s e 10 s, onde os registos de Verão atingem os 30 %. São de salientar, igualmente, as classes 6 - 7 s e 7 - 8 s com quase 20 % dos

registos nos meses de Maio a Agosto. A classe de 10 - 11 s é a mais equilibrada quanto aos registos para todos os meses variando, sensivelmente, entre os 10 % e 15 %. A partir dos 17 s são poucos os registos e os que há pertencem aos meses de Inverno, de Outubro a Março.

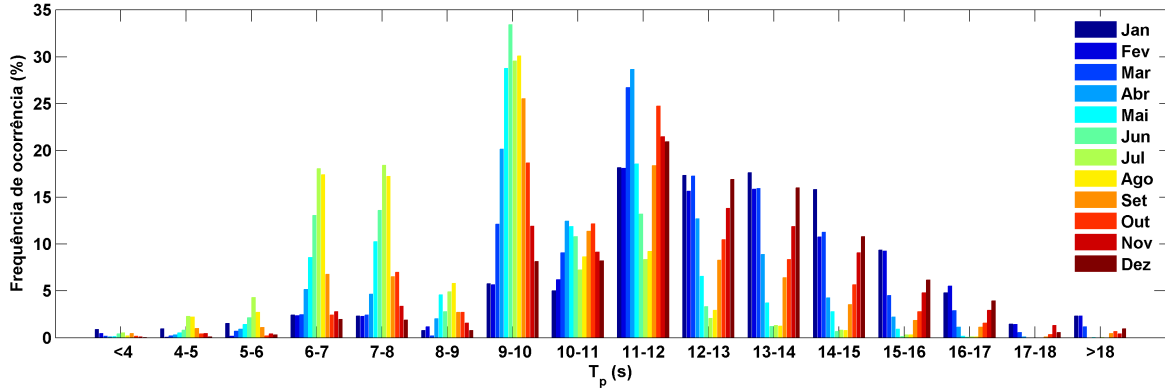


Figura 5.4: Distribuição mensal do período de pico.

Na Tabela 5.5 estão representados o número de registos da altura de onda significativa em função do período médio. Verifica-se que, para maiores alturas estão associados maiores períodos mas, por outro lado, o número de registos diminui. O intervalo do período médio entre 5 s e 6 s e o da altura entre 1 m e 2 m é o que contém maior número de registos, representando quase 13 % dos registos. Considerando o intervalo de  $H_s$  de 1 m a 3 m para todas as classes de  $T_m$ , este contém mais de 70 % das ocorrências totais. O intervalo de  $T_m$  de 4 s a 7 s para alturas entre 1 m e 2 m representa 33 % dos registos. Para valores de altura de onda acima de 9 m só se verificam períodos acima de 12 s, contudo apenas existem 10 registos. O mesmo se verifica para períodos acima de 12 s, cujo número de ocorrências é inferior a 1 %.

Tabela 5.5: Número de registos por alturas de onda significativa e respectivos períodos médios.

$T_m$ (s)	$H_s$ (m)											$\Sigma$
	<1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	>10	
<3	32	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	36
3-4	453	311	1	0	0	0	0	0	0	0	0	765
4-5	1219	3122	276	1	0	0	0	0	0	0	0	4618
5-6	1173	4251	1975	146	4	0	0	0	0	0	0	7549
6-7	616	3280	2040	694	113	2	0	0	0	0	0	6745
7-8	268	2119	1666	970	338	55	4	0	0	0	0	5420
8-9	70	1091	1261	826	433	110	33	7	1	0	0	3832
9-10	5	482	661	532	285	128	63	13	3	0	0	2173
10-11	1	143	324	263	138	68	52	15	2	0	0	1006
11-12	1	23	157	142	96	28	28	19	30	0	0	497
12-13	1	3	36	42	37	34	11	8	4	3	0	179
13-14	0	1	0	18	18	5	13	3	1	1	2	62
>14	0	2	1	2	14	4	8	8	3	2	2	46
$\Sigma$	3839	14832	8398	3636	1476	435	212	73	17	6	4	32928

Relacionando a direcção média da ondulação com a altura de onda significativa (Tabela 5.6), verifica-se que o rumo NW contém o maior número de registos, estando as maiores ocorrências para alturas entre 1 m e 2 m. É nos rumos de NW e WNW que se inserem os registos com maiores alturas de onda. Por outro lado, os rumos de SSW e S apenas contêm registos de alturas abaixo dos 4 m e o mesmo acontece para os rumos N e NNW.

Tabela 5.6: Número de registos por rumos e respectivas alturas de onda significativa.

$H_s$ (m)	Rumos									$\Sigma$
	N	NNW	NW	WNW	W	WSW	SW	SSW	S	
<1	35	775	1472	1016	366	104	30	9	1	3808
1-2	68	2779	6092	3997	1315	307	152	50	11	14771
2-3	25	1118	3924	2217	654	267	143	46	2	8396
3-4	12	173	1700	1149	312	163	106	21	0	3636
4-5	7	41	672	508	134	65	45	4	0	1476
5-6	4	6	194	160	51	14	6	0	0	435
6-7	1	0	86	106	13	5	1	0	0	212
7-8	2	0	28	35	8	0	0	0	0	73
8-9	0	0	8	7	2	0	0	0	0	17
9-10	0	0	4	2	0	0	0	0	0	6
>10	0	0	2	2	0	0	0	0	0	4
$\Sigma$	154	4892	14182	9199	2855	925	483	130	14	32834

Da análise da Tabela 5.7, que relaciona a direcção média da ondulação com o período médio, nota-se um comportamento semelhante ao observado, anteriormente, na Tabela 5.6. Os rumos de NW e NNW contêm 70 % dos registos associados a toda a série de  $T_m$  e, são também, os que contêm os registos de valores mais altos de período médio. Mais uma vez, os rumos SSW e S apenas contêm registos de períodos abaixo de 6 s e acima de 3 s, enquanto o rumo N contêm registos de valores de período até 11 s.

A relação obtida entre os vários parâmetros estão em conformidade com os trabalhos de Coelho (2005) e Capelo (2012). Apesar das classes definidas para  $H_s$  não serem iguais, a tendência é a mesma.

Tabela 5.7: Número de registos por rumos e respectivos períodos médios.

$T_m$ (s)	Rumos									$\Sigma$
	N	NNW	NW	WNW	W	WSW	SW	SSW	S	
<b>&lt; 3</b>	7	6	3	1	2	1	0	0	0	20
<b>3 - 4</b>	44	259	215	85	50	19	12	16	5	695
<b>4 - 5</b>	62	1494	1610	772	395	129	95	45	8	4610
<b>5 - 6</b>	8	1508	3089	1808	621	281	178	55	1	7549
<b>6 - 7</b>	7	805	2860	1966	681	289	125	12	0	6745
<b>7 - 8</b>	18	487	2427	1726	551	144	65	2	0	5420
<b>8 - 9</b>	3	224	1899	1346	303	50	7	0	0	3832
<b>9 - 10</b>	3	71	1133	792	163	10	1	0	0	2173
<b>10 - 11</b>	1	24	504	411	64	2	0	0	0	1006
<b>11 - 12</b>	1	16	285	171	24	0	0	0	0	497
<b>12 - 13</b>	0	6	103	69	1	0	0	0	0	179
<b>13 - 14</b>	0	1	33	28	0	0	0	0	0	62
<b>&gt; 14</b>	0	1	21	24	0	0	0	0	0	46
<b><math>\Sigma</math></b>	154	4892	14182	9199	2855	925	483	130	14	32834

### 5.1.3 Eventos de Temporal

Os temporais que assolam a costa portuguesa provocam grandes alterações na morfodinâmica das praias, potenciando trocas transversais da praia emersa para a praia submersa, bem como intensificando a velocidade da corrente de deriva litoral. Tendo em conta este aspecto e os objectivos propostos realizou-se uma análise mais pormenorizada dos temporais que ocorreram na última década.

Foram considerados eventos de temporal ondas com alturas significativas superiores a  $H_{s_{pico}} = 4.34 \text{ m}$  e a altura que define a duração do evento corresponde a  $H_{s_{dur}} = 3.22 \text{ m}$ , como definido na Subsecção 4.5.2. A Tabela 5.8 apresenta o número de eventos, por mês, entre Janeiro de 2003 e Abril de 2014.

Os meses que registam maior número de temporais são Janeiro, Fevereiro, Novembro e Dezembro, enquanto os meses com menos ocorrências são os meses de Verão, Junho, Julho e Agosto. A média de eventos por ano, para a série, é de 15.3 eventos; há 5 anos cujo o número de eventos registados está acima da média, sendo estes 2003, 2006, 2008, 2009 e 2013. O ano 2013 foi o que teve mais eventos de toda a série analisada, com 21 temporais, seguido de 2009 e 2003 com 19 e 18 eventos, respectivamente. O ano 2014 só apresenta informação até Abril mas, já se registaram 10 eventos. Por outro lado, os anos que registaram menor número de eventos foram 2005 e 2012 com 9 e 7 temporais, respectivamente.

De seguida, é apresentado na Tabela 5.9 o número de registos durante eventos de temporal para o mesmo período. Analisando os registos, verifica-se que os meses de Janeiro, Fevereiro e Dezembro são os que apresentam maior registo durante eventos de temporal, correspondendo a quase 60 % dos registos de temporal. No total, 9 % dos registos são em situação de temporal.

Os meses Dezembro de 2013 e Janeiro e Fevereiro de 2014 são os que contêm mais registos em períodos de temporal, cerca de 15 % dos registos. O mês de Dezembro regista mais de 16 dias de temporal, enquanto em Janeiro de 2014 ocorreram 18 dias e em Fevereiro quase 22 dias foram de temporal. Tendo em conta o número de temporais e de registos, consideram-se

Tabela 5.8: Número de eventos de temporal observados nos diferentes meses do período em análise.

<b>Ano</b>	<b>J</b>	<b>F</b>	<b>M</b>	<b>A</b>	<b>M</b>	<b>J</b>	<b>J</b>	<b>A</b>	<b>S</b>	<b>O</b>	<b>N</b>	<b>D</b>	<b><math>\Sigma</math></b>
<b>2003</b>	4	4	2	1	0	0	0	0	0	1	5	1	18
<b>2004</b>	2	1	2	2	1	0	0	0	0	3	0	4	15
<b>2005</b>	2	0	1	1	0	0	0	0	1	2	1	1	9
<b>2006</b>	3	2	4	1	1	0	0	0	1	1	3	1	17
<b>2007</b>	2	3	2	0	2	0	0	0	0	0	0	2	11
<b>2008</b>	4	1	3	2	0	0	0	1	1	1	2	2	17
<b>2009</b>	5	2	1	0	0	0	0	0	0	1	5	5	19
<b>2010</b>	1	4	2	1	0	0	0	0	0	4	3	0	15
<b>2011</b>	2	3	0	2	0	0	0	0	0	3	3	2	15
<b>2012</b>	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	1	3	7
<b>2013</b>	4	2	4	2	0	1	0	0	0	2	3	3	21
<b>2014</b>	2	6	2	0	-	-	-	-	-	-	-	-	10
<b><math>\Sigma</math></b>	31	28	23	14	4	1	0	1	4	18	26	24	174

estes eventos de temporais persistentes.

O número médio de registos durante temporais corresponde a 261.2 registos por ano. Os anos com número de registos acima da média correspondem, quatro deles (2003, 2006, 2009 e 2013), aos anos com número de eventos, igualmente, acima da média. O ano 2008 deu lugar a 2014, sendo este o segundo ano com maior número de registos em eventos de temporal. Os anos com maior número de eventos, 2013, 2009 e 2003, tiveram cerca de 48, 45 e 35 dias de temporal, respectivamente. No entanto, o ano 2014, com apenas 4 meses de informação e 3 deles com registo de eventos, deteve mais de 46 dias de temporal. Os anos com menos temporais registaram 12.62 dias (2005) e 10.25 dias (2012).

Tabela 5.9: Número de registos em eventos de temporal observados nos diferentes meses do período em análise.

<b>Ano</b>	<b>J</b>	<b>F</b>	<b>M</b>	<b>A</b>	<b>M</b>	<b>J</b>	<b>J</b>	<b>A</b>	<b>S</b>	<b>O</b>	<b>N</b>	<b>D</b>	<b><math>\Sigma</math></b>
<b>2003</b>	96	57	36	9	0	0	0	0	0	11	67	9	285
<b>2004</b>	31	10	19	45	11	0	0	0	0	46	0	36	198
<b>2005</b>	29	0	17	5	0	0	0	0	8	18	12	12	101
<b>2006</b>	41	49	45	4	9	0	0	0	13	8	63	55	287
<b>2007</b>	16	84	42	0	16	0	0	0	0	0	0	32	190
<b>2008</b>	76	13	47	27	0	0	0	8	13	5	22	35	246
<b>2009</b>	114	44	22	0	0	0	0	0	0	17	85	81	363
<b>2010</b>	28	67	25	8	0	0	0	0	0	50	40	0	218
<b>2011</b>	20	79	0	9	0	0	0	0	0	30	44	51	233
<b>2012</b>	0	0	0	21	0	0	0	0	6	0	5	50	82
<b>2013</b>	69	25	61	18	0	4	0	0	0	33	44	133	387
<b>2014</b>	146	173	51	0	-	-	-	-	-	-	-	-	370
<b><math>\Sigma</math></b>	666	601	365	146	36	4	0	8	40	218	382	494	2960

Tendo em conta as séries de dados topográficos, relacionaram-se alguns parâmetros em

função dos períodos das campanhas. Assim, construiu-se a Tabela 5.10 com os eventos e dias de temporal, a média dos rumos de temporal (rumos correspondentes a  $H_s \geq 3.34 \text{ m}$ ), a altura máxima ( $H_{s \text{ max}}$ ) e o período de pico máximo ( $T_{p \text{ max}}$ ).

Tabela 5.10: Análise dos eventos de temporal pelos intervalos temporais dos dados topográficos.

Intervalo	Nº de eventos	Nº dias de temporal	$\bar{Dir}M$ (°)	$H_{s \text{ max}}$ (m)	$T_{p \text{ max}}$ (s)
Nov 2003 - Jan 2008	58	107.00	300.78	7.57	20.80
Jan 2008 - Mar 2012	64	128.87	297.15	7.97	19.40
Mar 2012 - Out 2013	20	32.37	292.83	8.51	18.20
Out 2013 - Fev 2014	10	44.50	298.51	8.23	18.20
Fev 2014 - Abr 2014	8	28.00	298.15	9.28	18.20

O primeiro intervalo vai de Novembro de 2003 a Janeiro de 2008; durante este período ocorreram 58 temporais que corresponderam a 107 dias, cerca de 7 % do total de dias, registou-se uma altura máxima de 7.57 m e período de pico de 20.80 s. Os valores médios da direcção da ondulação situam-se todos no quadrante WNW ( $300.78^\circ$ ). Projectando a série correspondente numa rosa de rumos obtém-se que 90 % dos registos estão divididos entre os rumos NW e WNW e cerca de 7 % são registos de W (Figura 5.5a).

De Janeiro de 2008 a Março de 2012 ocorreram 64 temporais que contabilizaram perto de 129 dias de temporal (8.70 %), a altura máxima registada foi de 7.97 m e o período de pico foi de 19.40 s. Quanto à direcção da ondulação, quase 50 % dos registos apresentam rumos de NW, cerca de 33 % de WNW e 7.50 % de W (Figura 5.5b). Comparando a direcção média ( $297.15^\circ$ ) deste período com o valor obtido no intervalo de Novembro de 2003 a Janeiro de 2008, os dados sugerem uma ligeira rotação do rumo médio para WNW.

De Março de 2012 a Outubro de 2013, apenas 5 eventos ocorreram no período referente a 2012, correspondendo a 7.62 dias de temporal. A altura de onda significativa máxima registada foi de 8.51 m e o período de pico foi de 18.20 s. Os rumos NW e WNW perfazem 70 % dos registos, divididos entre ambos, contudo 22 % dos registos são de W e 7 % de WSW (Figura 5.5c).

No intervalo de Outubro de 2013 a Fevereiro de 2014 registaram-se 10 eventos de temporal sendo que atingiu mais de 50 % dos dias, a altura e período de pico estão próximos do registado para o período anterior, contudo, mais de 30 % das ocorrências apresentam alturas acima de 5.50 m. Quanto à direcção mais de 55 % dos registos são de WNW e 38 % de NW (Figura 5.5d).

O último intervalo, Fevereiro a Abril de 2014, registou 8 eventos e mais de 66 % dos dias de temporal. Um dos eventos registados teve a duração de 10 dias, tendo ocorrido no início de Fevereiro. A altura máxima foi de 9.28 m e o período de pico de 18.20 s. A rosa de rumos mostra predominância dos rumos de WNW e NW com mais de 85 % dos registos e cerca de 13 % de W (Figura 5.5e).

A evolução dos parâmetros para cada período demonstra, por um lado, que o número de eventos de temporal por ano mantém-se constante, mas o número de dias aumentou, assim como a altura de onda significativa. Por outro lado, o período de pico tem diminuído, mantendo-se constante nos últimos anos. O intervalo analisado é demasiado curto para tirar conclusões relativamente a como os eventos de temporal têm evoluído. Contudo, trabalhos realizados sobre variação e tendência de tempestades, como os de Ferreira *et al.* (2009) e Wang

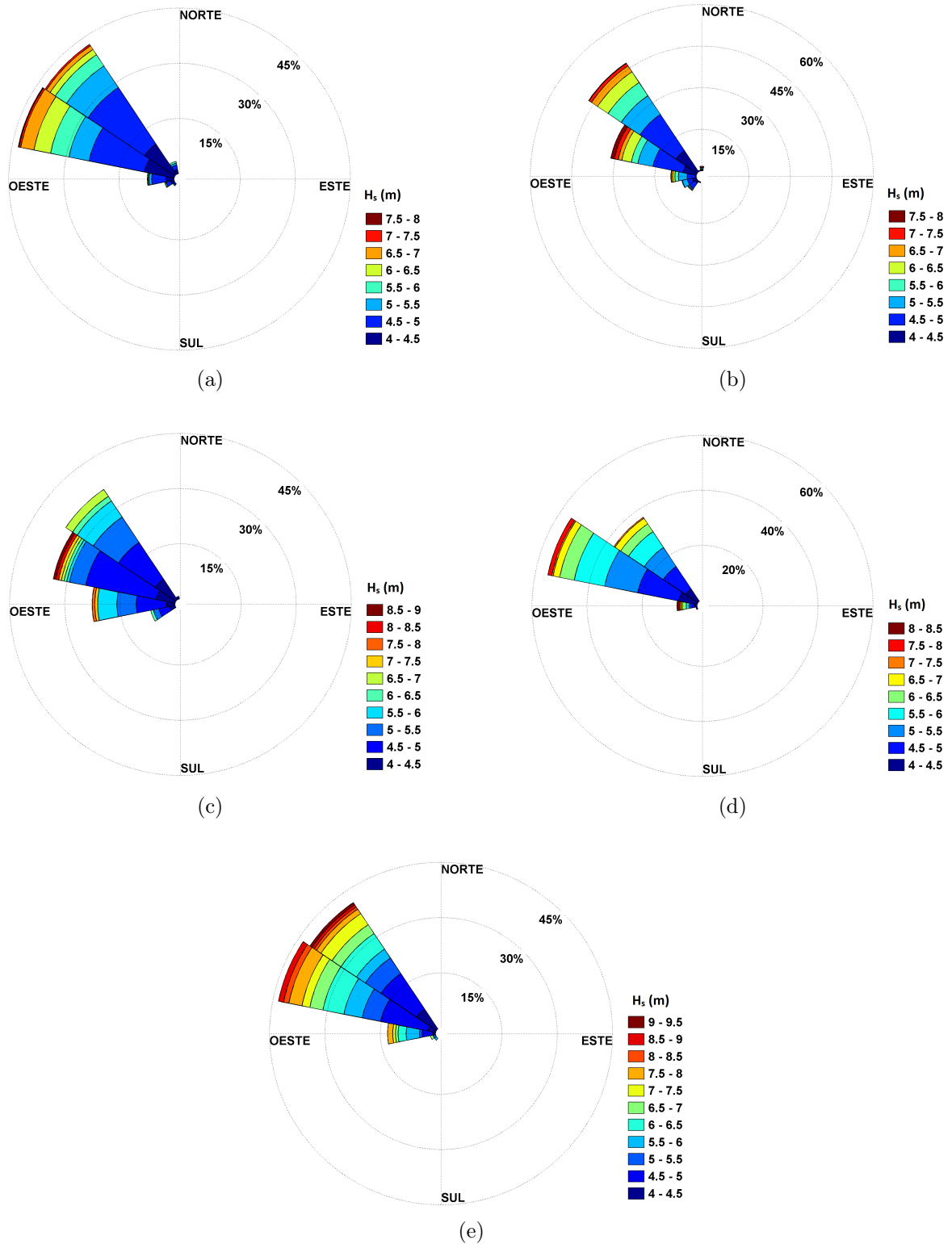


Figura 5.5: Rosa de rumos da direcção de ondulação correspondente a  $H_s \geq H_{s(pico)}$  para cada período analisado: (a) Novembro de 2003 a Janeiro de 2008, (b) Janeiro de 2008 a Março de 2012, (c) Março de 2012 a Outubro de 2013, (d) Outubro de 2013 a Fevereiro de 2014 e (e) Fevereiro a Abril de 2014.

*et al.* (2011), revelam que as condições de tempestade têm sofrido flutuações significativas à escala temporal da década ou superior, sem registar nenhuma tendência considerável.

Pelos resultados obtidos, e pelos danos causados, o último Inverno (2013 - 2014) foi particularmente rigoroso. Segundo o IPMA (2014a), desde meados do mês de Dezembro de 2013 formaram-se depressões muito cavadas no Atlântico Norte que originaram valores muito elevados de ondulação, atingindo, no dia 6 de Janeiro, alturas significativas de cerca de 9 metros na costa ocidental portuguesa. Na bóia de Leixões foram registadas ondas com  $H_s$  até 9 m e altura máxima de 13,5 m. Adicionalmente, foram registadas ondas com um período médio de cerca de 12 s, tendo sido atingidos períodos máximos superiores a 20 s. A direcção de procedência da ondulação foi de WNW.

Nos dias 8 e 9 de Fevereiro de 2014 voltou-se a verificar um fenómeno semelhante. O vento intenso associado à depressão originou agitação marítima forte no Atlântico, tendo sido registado nas bóias ondógrafo do Instituto Hidrográfico ondas com altura significativa até 8 m e altura máxima de 12.5 m, em Leixões, associadas a um período médio de 10 s.

Ao contrário da ondulação ocorrida em Janeiro, a gerada pela tempestade de Fevereiro apresentou um período médio de 10 s, explicado pelo facto de ter ocorrido substancialmente mais perto da costa Oeste portuguesa e durante menos tempo, quando comparadas com as ondas da tempestade de Janeiro ao longo do seu trajecto ao longo de uma enorme faixa no Atlântico Norte (IPMA, 2014a).

Comparando os valores obtidos de altura da onda máxima e de período de pico verifica-se que estes são inferiores aos valores reportados pelo IPMA (2014a). Como a série usada corresponde à junção de dados medidos com dados simulados é, provavelmente, por isso que se observam estas diferenças. Quanto à direcção, esta parece corresponder à reportada por esta identidade.

## 5.2 Variabilidade Morfológica

Esta secção apresenta os resultados obtidos para a evolução temporal de cada sector, definidos na Subsecção 4.1.1, dividida em dois tipos de análise: a variabilidade morfológica baseada nos MDT e a variação do volume de sedimentos por metro linear de praia ( $m^3/m$ ). Na análise dos MDT, faz-se uma caracterização da praia em termos de variações de cotas, sendo este um indicador das tendências erosivas e acrecionárias da praia, e das suas localizações, as quais serão corroboradas na secção dos balanços sedimentares.

Para cada tipo de análise ainda serão estudados, separadamente, a praia emersa e a praia submersa, avaliando em que parte se verificam maiores alterações e o comportamento de cada uma.

### 5.2.1 Variabilidade Morfológica ao Longo da Última Década

As campanhas de Novembro de 2003 e Janeiro de 2008 foram realizadas durante o Inverno marítimo; no entanto, foram em alturas do ano que ainda não tinham ocorrido eventos de temporal consideráveis. Antes da campanha de 2003 houve um evento relevante que ocorreu entre os dias 30 de Outubro e 1 de Novembro de 2003 e atingiu uma altura significativa máxima de 10.57 m; em 2008, ocorreu um evento entre os dias 2 e 5 de Janeiro e com altura significativa máxima de 7.23 m. A acção dos eventos mais persistentes que ocorreram antes de



cada campanha podem ter provocado alterações no perfil da praia, contudo ainda são visíveis bermas em alguns sectores, associadas ao perfil de Verão.

Para o primeiro sector, CNV, representado na Figura 5.6, observa-se em 2003 uma praia relativamente larga a Norte, que vai estreitando para Sul com algumas bermas bem definidas na média praia, com cotas entre 5 m e 6 m, a sotamar do esporão Sul da Costa Nova. Em 2008, identifica-se uma crista associada a uma berma na praia a Norte do esporão Sul da Costa Nova. Na zona imediatamente a Sul do esporão, o modelo 3D tem um aspecto ondulado, o que se deve a um problema que ocorreu aquando da aquisição dos dados, o que impossibilitou definir os limites, superior e inferior, da praia emersa.

Comparando os dois modelos do terreno, 2003 e 2008, observa-se que, a Norte, houve um aumento de cotas, que se deve à presença de uma berma. Por outro lado, a Sul do esporão observam-se variações pontuais de aumento e diminuição de cotas que variam entre -3 m a 3 m. Para o período de 2008 a 2013 as cotas da praia mantiveram-se constantes, registando-se apenas cotas mais altas nas cristas das bermas e a existência de sistemas de crista - canal no MDT de 2013 (Anexo 1).

Analisando o sector da Vagueira ao Areão verifica-se que em 2003 a praia se apresentava mais larga, comparativamente, a 2008 (Figura 5.7). Em 2008 o levantamento de campo foi efetuado pela base do dique arenoso que tinha sido edificado nesse ano. Entretanto, com o desenvolvimento de vegetação numa posição próxima à da antiga base do cordão dunar os levantamentos seguintes foram acompanhando os limites dessa vegetação.

Contudo, observa-se um aumento da cota ao longo de todo o sector, mas mais pronunciado na metade Sul, que se poderá dever à retenção sedimentar que tipicamente ocorre a barlar de um esporão (esporão Sul). O mesmo se verifica para o período 2008 a 2012 apresentado no Anexo 2 mas menos pronunciado. Em 2012, houve recuo da linha de costa a sotamar do esporão do Labrego, verificando-se também a diminuição da elevação na parte mais alta da praia. De 2012 a 2013 não se registam variações significativas no sector (Anexo 3).

A evolução temporal dos sectores APC (Figura 5.8) e PCM (Figura 5.9) mostra, perfeitamente, a adaptação da praia e da linha de costa à presença dos esporões do Areão e do Poço da Cruz. De 2003 para 2008 verificou-se, na metade Norte de ambos os sectores, forte tendência erosiva enquanto, na metade Sul, observou-se acreção, com aumento da cota e alargamento da praia (Figura 5.10). A sotamar dos esporões verificou-se acreção o que está associado à curvatura dos esporões para Sul ( $30^\circ$ ). De 2008 a 2013, para o sector APC, observa-se um estreitamento da praia e um recuo da linha de contacto praia-duna (Anexo 4). A adaptação da praia ao esporão ainda se verifica mas é menos pronunciada.

A praia a Sul do esporão do Poço da Cruz, até à altura da construção do esporão, em 2003, encontrava-se estável, o que se pode verificar nos gráficos da Figura 3.13, na Secção 3.7; estando mais a Sul beneficiava dos sedimentos transportados na corrente de deriva erodidos a barlar. No entanto, a construção do esporão veio provocar alterações significativas a sotamar, incluindo a rotação da praia devido à presença desta estrutura. Como se pode ver no mapa das diferenças da Figura 5.9, em quase metade do sector a linha de costa sofreu um recuo tal que, sobrepondo os MDT de 2003 e 2008, estes não coincidem.

Entre 2008 e 2012, a perda de praia generalizou-se a todo o sector PCM, registando-se recuo da linha de costa e rebaixamento da praia (Anexo 5). De Março de 2012 a Outubro de 2013 não se registou uma evolução significativa, verificou-se já uma estabilização da praia

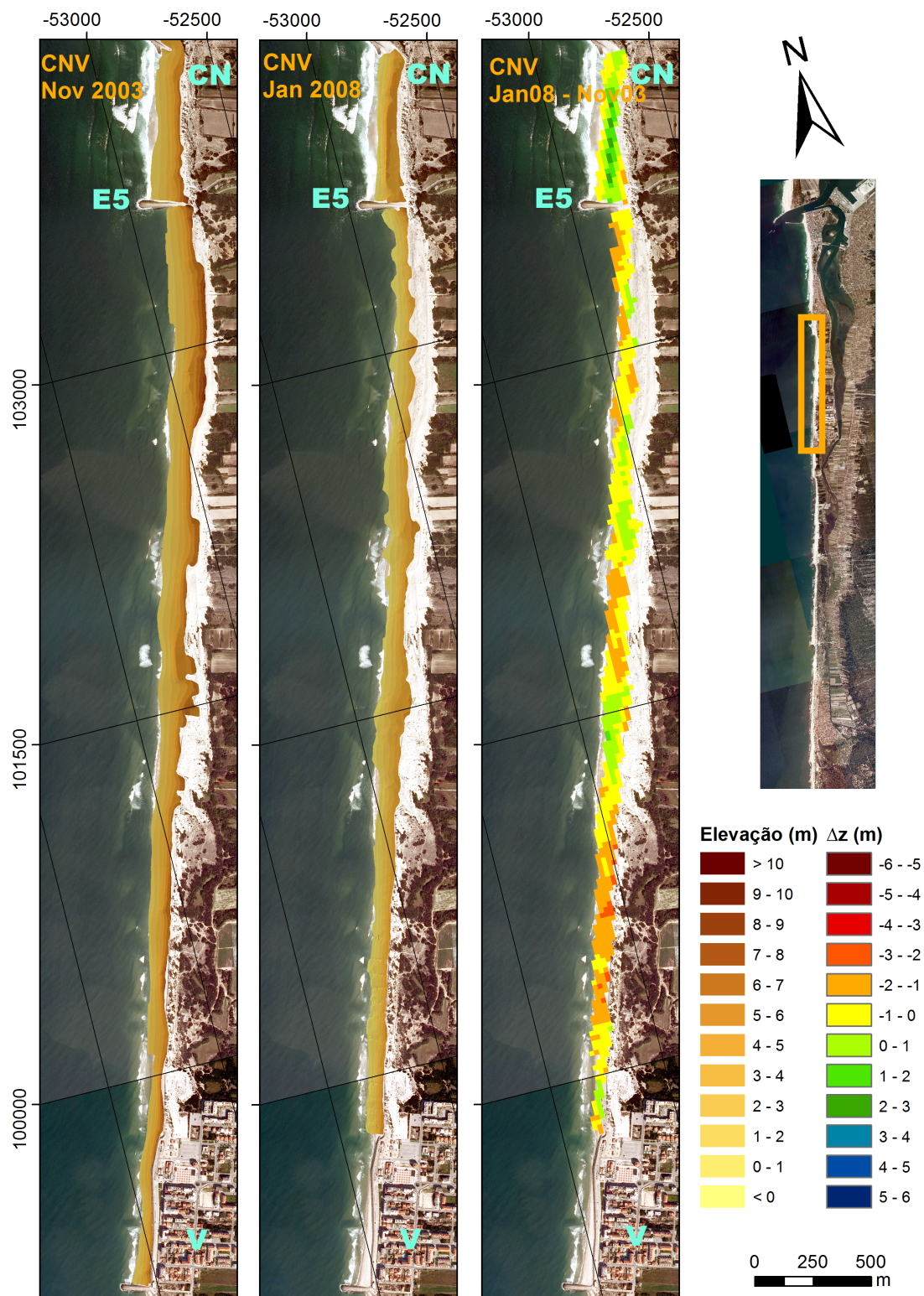


Figura 5.6: Evolução temporal da geomorfologia no sector CNV para o período de Novembro de 2003 a Janeiro de 2008. Para o mapa das diferenças valores superiores a 0 m (verdes e azuis) correspondem a acreção e os valores inferiores a 0 m (amarelos e vermelhos) a erosão. CN - Costa Nova e V - Vagueira correspondem às localidades.



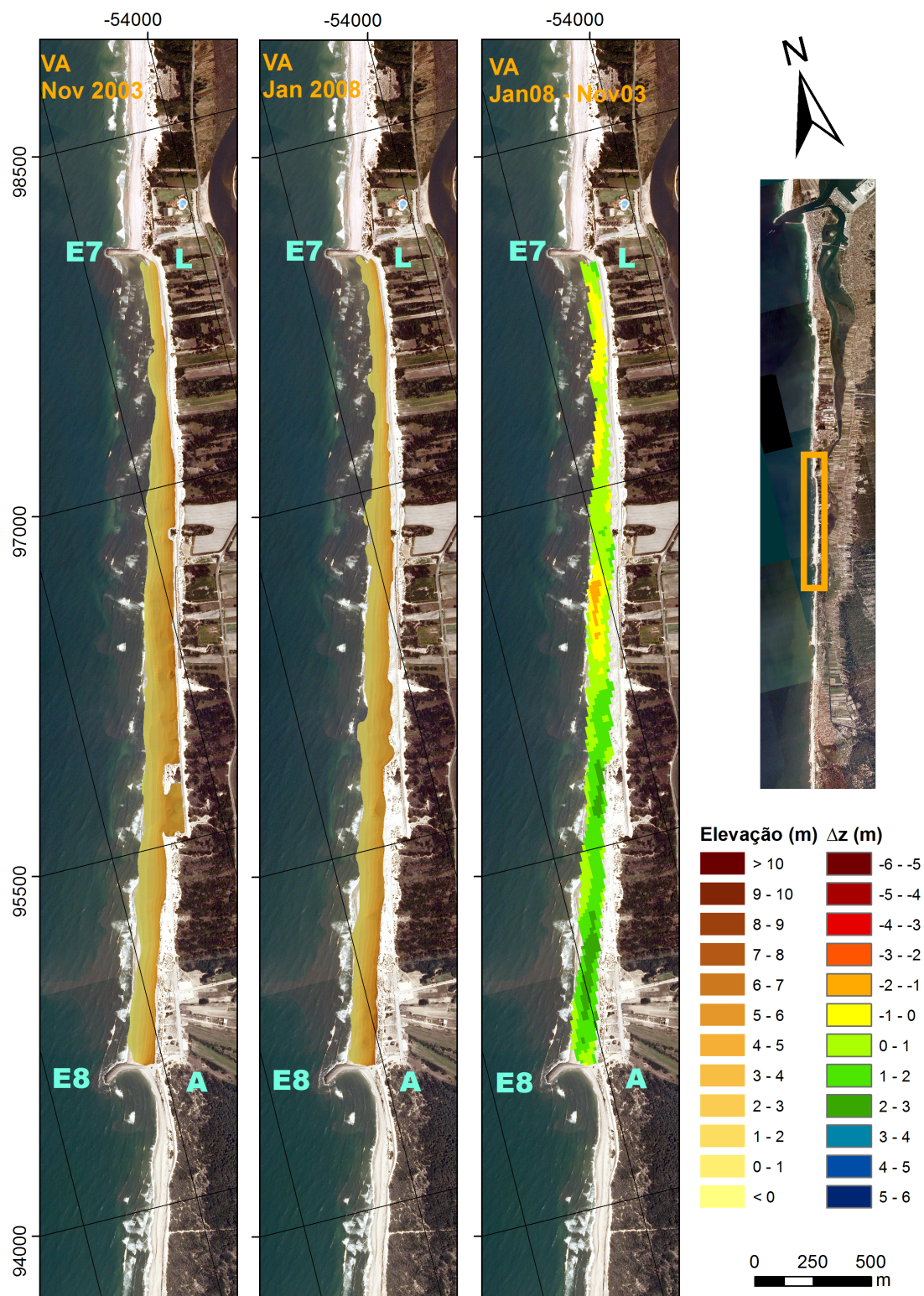


Figura 5.7: Evolução temporal da geomorfologia no sector VA para o período Novembro de 2003 a Janeiro de 2008. Para o mapa das diferenças valores superiores a 0 m (verdes e azuis) correspondem a acreção e os valores inferiores a 0 m (amarelos e vermelhos) a erosão. L - Labrego e A - Areão correspondem às localidades.



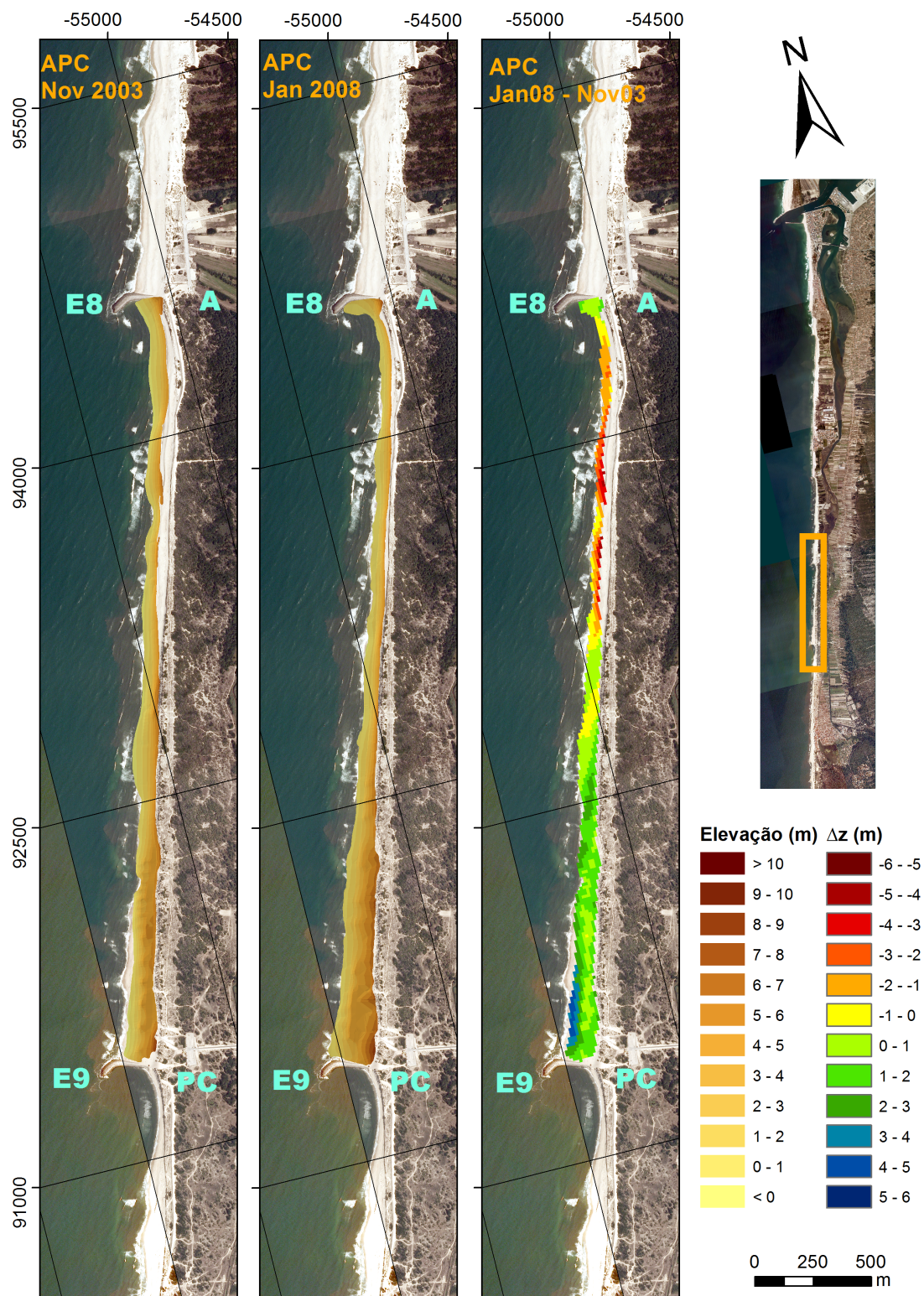


Figura 5.8: Evolução temporal da geomorfologia no sector PCM para o período Novembro de 2003 a Janeiro de 2008. Para o mapa das diferenças valores superiores a 0 m (verdes e azuis) correspondem a acreção e os valores inferiores a 0 m (amarelos e vermelhos) a erosão. A - Areão e PC - Poço da Cruz correspondem às localidades.



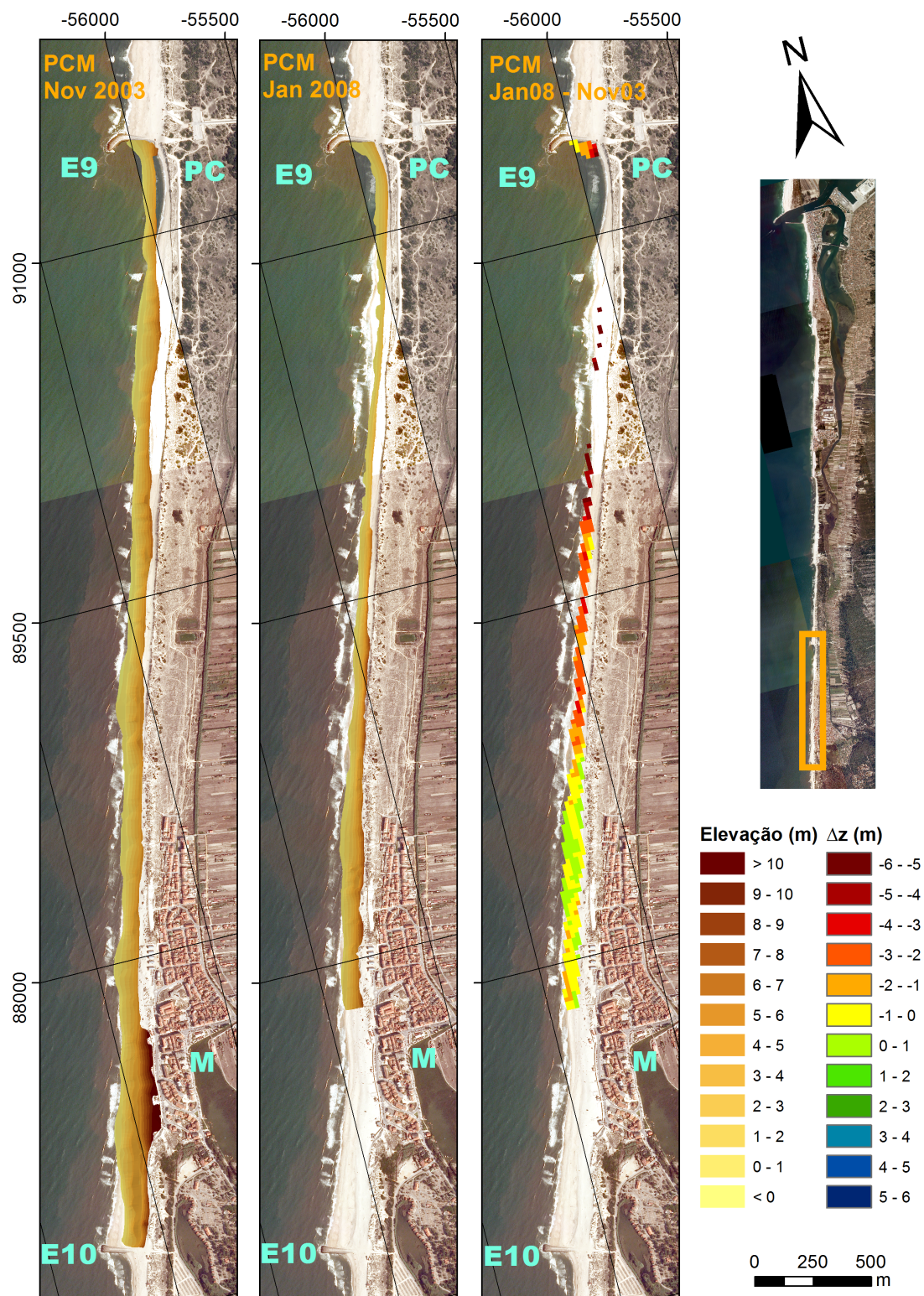


Figura 5.9: Evolução temporal da geomorfologia no sector PCM para o período Novembro de 2003 a Janeiro de 2008. Para o mapa das diferenças valores superiores a 0 m (verdes e azuis) correspondem a acreção e os valores inferiores a 0 m (amarelos e vermelhos) a erosão. PC - Poço da Cruz e M - Praia de Mira correspondem às localidades.



(a) Junho de 2002



(b) Setembro de 2007

Figura 5.10: Evolução da praia do Areão: (a) antes e (b) depois da construção do esporão.

a Sul do esporão do Poço da Cruz (Anexo 6). Da zona urbana da Praia de Mira ao esporão Sul a praia encontra-se larga, comparativamente ao resto do sector e com uma berma bem definida, entre as cotas 4 - 5 m.

Ao longo da última década, os sectores APC e PCM, representam, nos intervalos analisados, a adaptação do perfil de praia à edificação dos esporões, embora mais notória no sector PCM. Os sectores CNV e VA apresentam estabilização na elevação da praia com diferenças que podem atingir  $\pm 1$  m.

As zonas onde se registam mais alterações são a barlamar dos esporões, onde tende para acreção e na zona de sombra dos esporões que pode ocorrer erosão mais localizada. Estes processos tendem a intensificar-se com eventos de temporal, embora as escalas temporais a que as tempestades ocorrem (dias a semanas) não permitam a observação directa do impacte de eventos isolados nesta escala de observação das variações morfológicas. Contudo, comparando o período de 2003 - 2008 com 2008 - 2013, verificou-se uma rotação para NW na direcção de procedência da ondulação para eventos de temporal, além disso, houve um aumento de temporais (média de 14.00 eventos por ano entre 2003 e 2008 e de 15.64 por ano entre 2008 e 2013) e da altura significativa da ondulação, quanto à persistência dos temporais esta, também aumentou ligeiramente. Considerando estas variações seria justificável a intensificação de acumulações a barlamar e erosão a sotamar dos esporões. Porém, o que se verificou foi uma erosão generalizada ao longo de todo o troço costeiro do primeiro para o segundo intervalo.

De todos os sectores analisados, aquele que mais sofreu com fenómenos erosivos foi o sector do Poço da Cruz à Praia de Mira devido à construção do esporão do Poço da Cruz. O sector APC mostra uma tendência mais estável no último período analisado, enquanto o sector a Sul levou mais tempo a adaptar-se à presença do esporão do Poço da Cruz.

## 5.2.2 Variabilidade Morfológica Recente

Na evolução actual além da variabilidade morfológica da praia emersa será analisada a evolução da praia submersa para 3 sectores. No caso dos dados topográficos para os sectores BCN, CNV e dos dados topo-batimétricos apenas existe um intervalo de comparação.



## Praia Emersa

No MDT de Outubro de 2013 observam-se bermas bem definidas e sistemas crista - canal, exibindo um perfil reflectivo, típico de Verão marítimo. Por outro lado, em Fevereiro de 2014, o perfil da praia encontra-se mais aplanado e com cotas mais baixas, típico de um perfil de Inverno marítimo. Foi registado, durante as campanhas, galgamentos, arribas talhadas na duna ou em diques arenosos, destroços na praia da destruição dos passadiços e das paliçadas e blocos rochosos no areal remobilizados dos esporões pela acção das ondas, devido ao evento de temporal que ocorreu no início de Janeiro (Figura 5.11). Este evento teve uma duração de cerca de 5 dias e altura significativa máxima de 7.75 m.

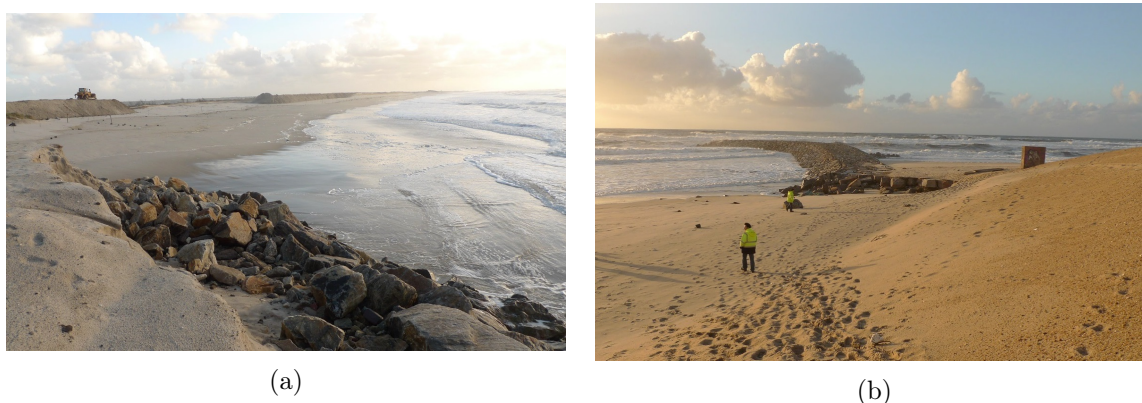


Figura 5.11: Estado das praias após temporal de Janeiro de 2014: a) praia do Labrego (Sul da Vagueira) e b) praia do Poço da Cruz.

Da BCN, verificou-se uma forte tendência erosiva, no entanto, observam-se pequenos núcleos de acreção em locais onde o comum é observar erosão, isto é, a sotamar dos esporões (Figura 5.12). As cotas mais altas junto ao cordão dunar devem-se, possivelmente, à areia proveniente das dunas erodidas pelo ataque da ondulação à base da duna.

No sector CNV, a zona onde se regista forte erosão é a barlamar do esporão Sul da Costa Nova e a Norte do enrocamento da Vagueira (Figura 5.13). Neste local, tem havido necessidade de se proceder ao enchimento artificial da praia, devido à actividade pesqueira que é importante nesta localidade.

Ao longo do sector, os locais onde se verifica diminuição das cotas correspondem a antigas bermas que durante o Inverno foram destruídas e os sedimentos foram levados para a praia submersa ou foram depositados ao longo do sector, proporcionando um ligeiro aumento de cotas (Figura 5.14).

O trecho VA apresenta uma praia estreita mas com bermas bem definidas ao longo de, praticamente, todo o sector em 2013. Avaliando a evolução de Outubro de 2013 para Fevereiro de 2014 observa-se um aumento considerável na largura da praia, o que poderá ser devido à redistribuição dos sedimentos que formavam a berma ou à remoção de sedimentos das dunas, embora não se tenha verificado recuo assinalável da linha de costa (Figura 5.15). Por outro lado, a campanha de Fevereiro pode ter sido realizada com o nível da maré mais baixo do que em Outubro de 2013, colocando mais praia a "descoberto". Na metade Norte do sector verifica-se um aumento da elevação da praia em 1-2 m, contudo, do meio do troço para S vê-se uma diminuição na elevação que pode ir até -4 m. No esporão do Areão ocorreu deposição de

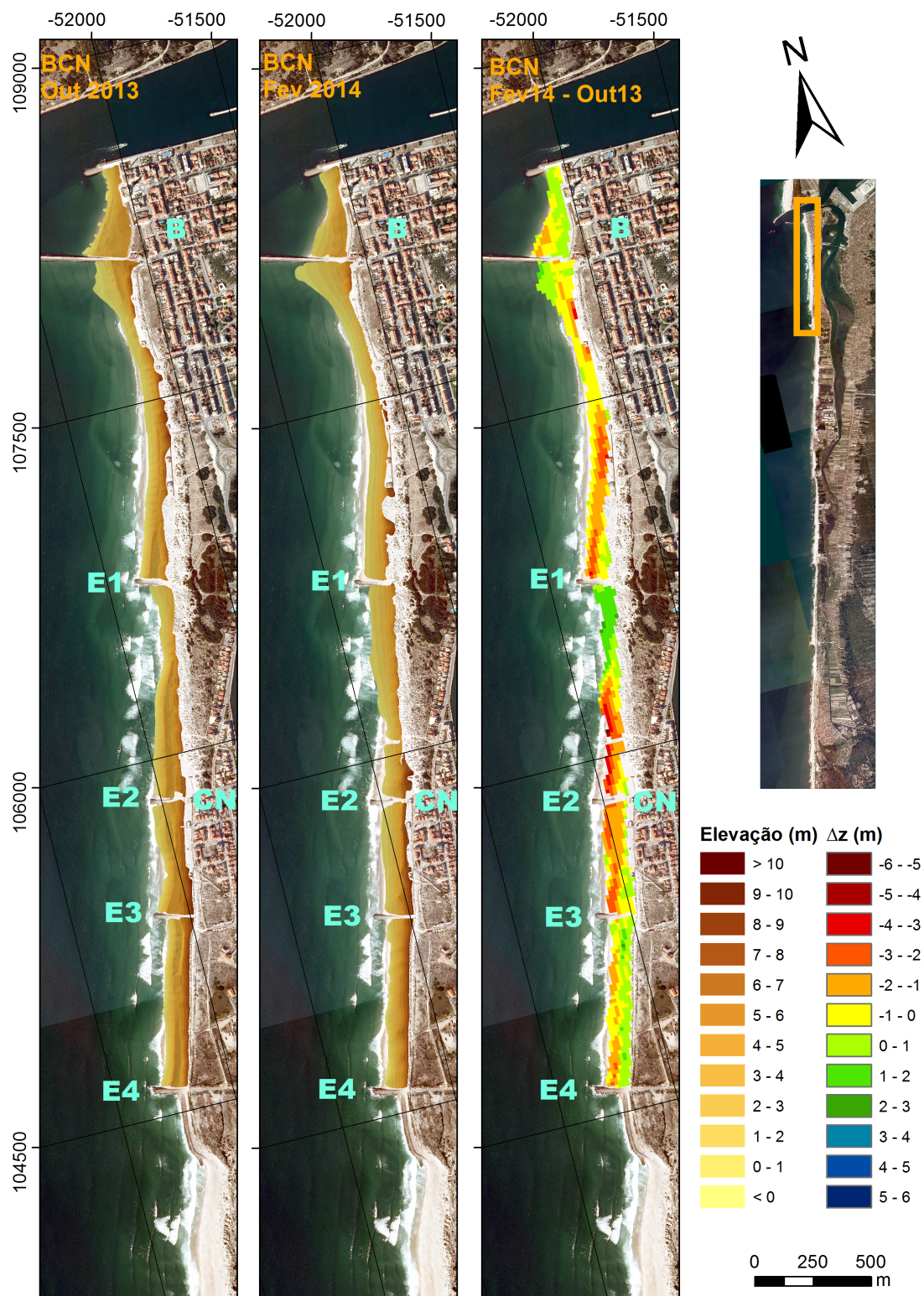


Figura 5.12: Evolução temporal da geomorfologia no sector BCN para o período Outubro de 2013 a Fevereiro de 2014. Para o mapa das diferenças valores superiores a 0 m (verdes e azuis) correspondem a acreção e os valores inferiores a 0 m (amarelos e vermelhos) a erosão. B - Barra e CN - Costa Nova correspondem às localidades.





Figura 5.13: Arriba talhada junto ao enrocamento na praia da Vagueira Norte.

sedimentos sobre a estrutura provenientes da praia a barlamar e provocada pelas condições de agitação marítimas observadas entre Dezembro de 2013 e Fevereiro de 2014. Na Figura 5.16 é, ainda, visível blocos rochosos provenientes do esporão dispersos pela praia, a sotamar.

Entre Fevereiro e Abril de 2014, regista-se a presença de sistemas de crista-canal e, até algumas bermas a meio do sector (Anexo 7). A diminuição das cotas junto à base do dique poderá corresponder a areia que foi erodida da base do dique, uma vez que, também se observa recuo da linha de costa.

No sector Areão - Poço da Cruz, de Outubro de 2013 para Fevereiro de 2014 verifica-se que nos primeiros 1.5 km, a sotamar ao esporão do Areão, a cota da praia manteve-se constante e a largura da praia aumentou; porém, no resto do sector ocorreu diminuição da altura da praia (Figura 5.17). Por outro lado, de Fevereiro a Abril de 2014, registou-se estabilização da cota da praia com aumento desta em alguns locais (Anexo 8). Registou-se vários sistemas de crista-canal, algumas bermas pouco pronunciadas e pequenas cúspides. Em ambos os períodos houve recuo da linha de costa, porém, mais acentuado entre Fevereiro e Abril.

No sector mais a Sul, do Poço da Cruz à Praia de Mira, em Fevereiro de 2014 a praia está mais larga, no primeiro quilómetro do sector, possivelmente porque devido às condições de agitação marítima observadas nos meses anteriores, a erosão do dique arenoso/cordão dunar poderá ter contribuído para alimentar a zona da baixa praia (Figura 5.18). Este aspecto pode-se confirmar através do mapa das diferenças de cota, onde se observa diminuição das cotas na parte superior da praia. A meio do sector e para Sul observa-se erosão mais evidente acompanhada pelo recuo da linha de contacto praia-cordão dunar. Em Abril, a praia apresentava sistemas de crista-canal e cúspides, e acreção junto ao esporão do Poço da Cruz (Anexo 9). Em geral, não se registou diminuição significativa na cota da praia mas houve recuo da linha de costa em quase todo o sector.

A variação de cotas, entre Outubro 2013 e Fevereiro de 2014, em praticamente todos os sectores, é pouco comum para as características desta costa. Na situação normal, em que a corrente de deriva litoral tem sentido N-S e a direcção predominante da ondulação é de NW, verifica-se acreção a barlamar dos esporões e erosão a sotamar. Neste caso, o que se verifica é exactamente o contrário, observando-se erosão a Norte dos esporões e acreção a Sul. Esta alteração nas características da deposição pode-se dever a eventos de temporal cuja ondulação rumou de WSW ou SW. De facto, houve episódios de temporal com estas características em Dezembro de 2013, entre os dias 24 e 27, cujo a direcção média da ondulação foi de WSW; em Janeiro de 2014, os eventos registados apresentam direcção média da ondulação entre W

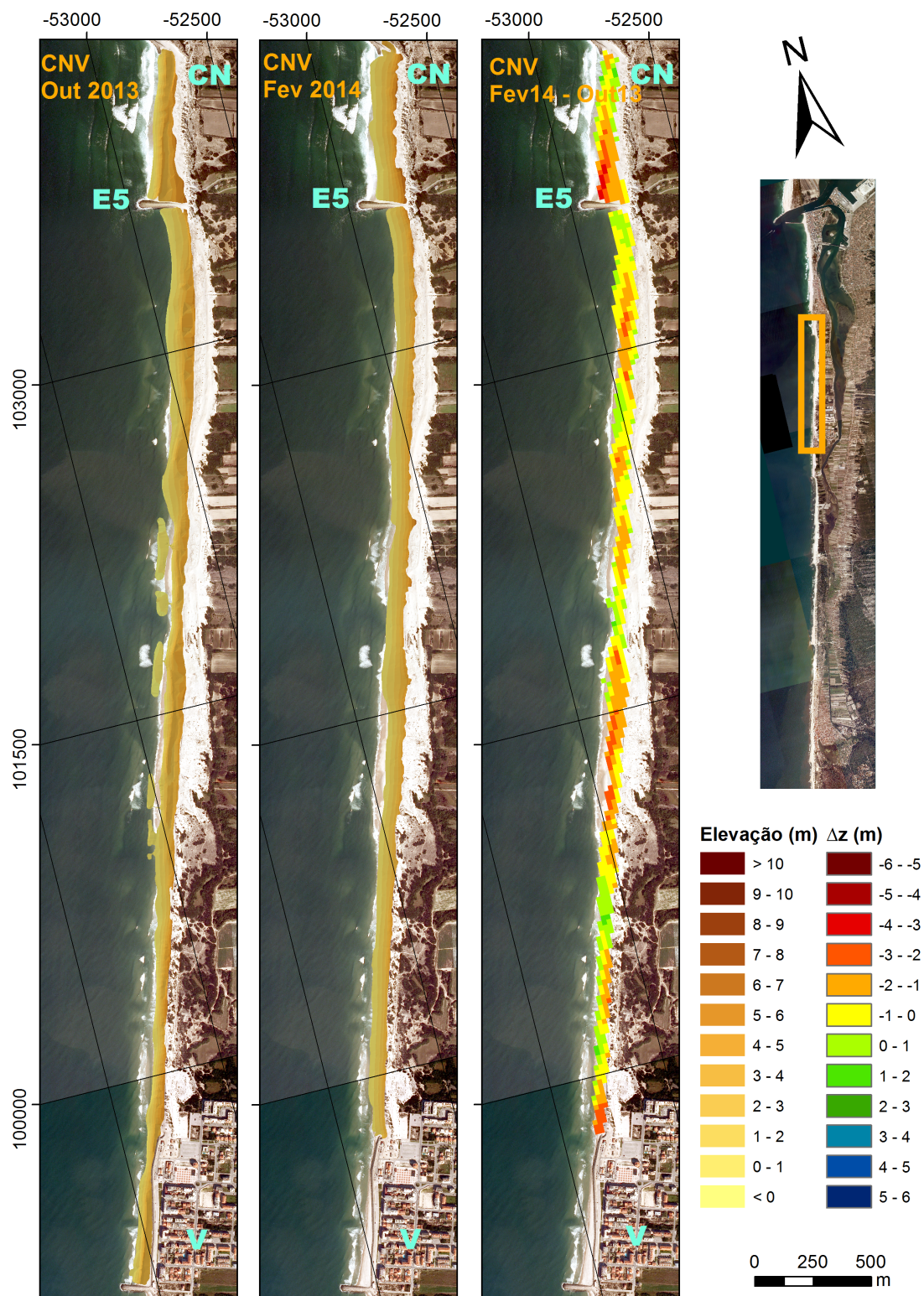


Figura 5.14: Evolução temporal da geomorfologia no sector CNV para o período Outubro de 2013 a Fevereiro de 2014. Para o mapa das diferenças valores superiores a 0 m (verdes e azuis) correspondem a acreção e os valores inferiores a 0 m (amarelos e vermelhos) a erosão. CN - Costa Nova e V - Vagueira correspondem às localidades.



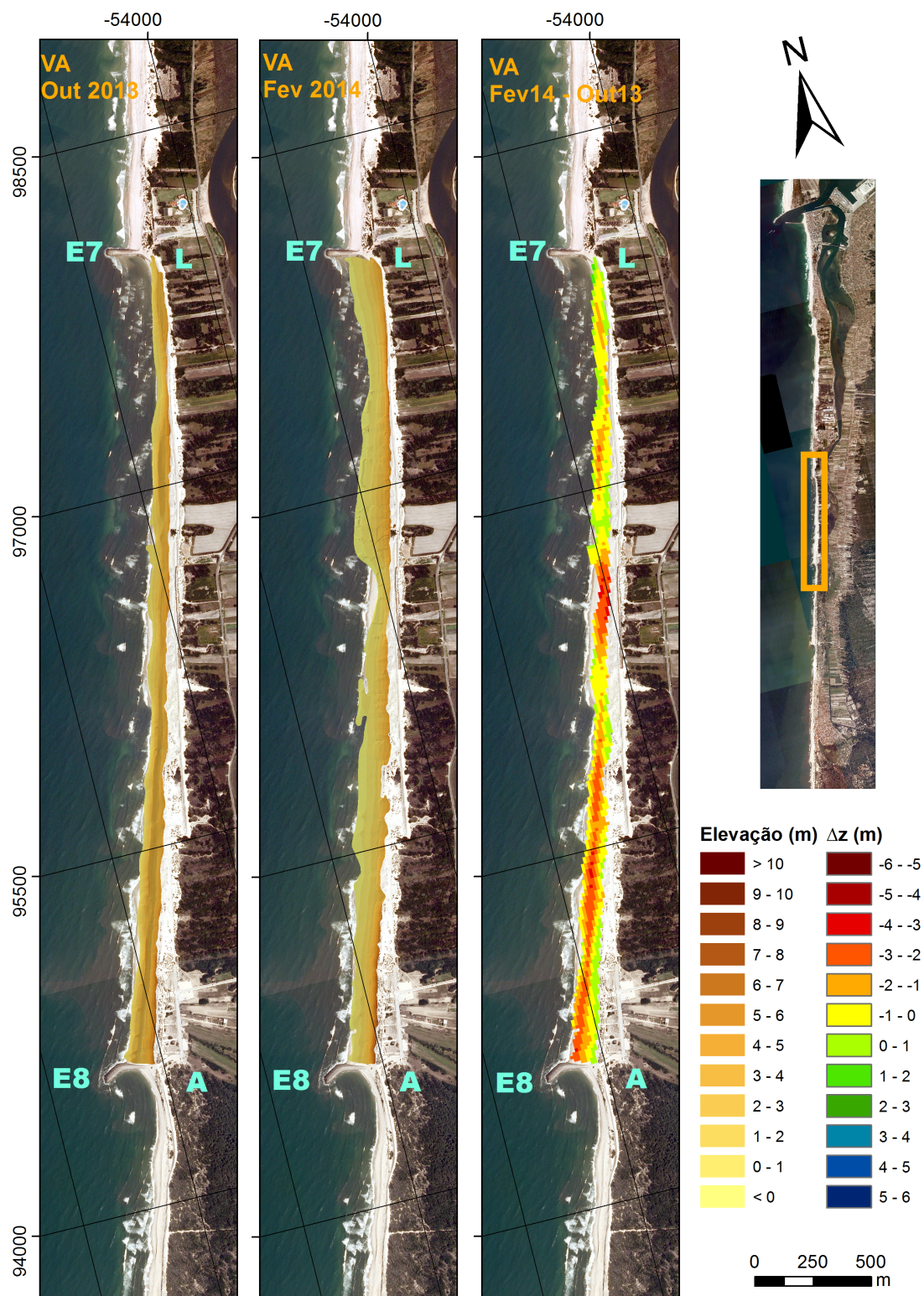


Figura 5.15: Evolução temporal da geomorfologia no sector VA para o período Outubro de 2013 a Fevereiro de 2014. Para o mapa das diferenças valores superiores a 0 m (verdes e azuis) correspondem a acreção e os valores inferiores a 0 m (amarelos e vermelhos) a erosão. L - Labrego e A - Areão correspondem às localidades.



Figura 5.16: Deposição de areia sobre o esporão e remobilização de rochas provenientes do esporão por acção da ondulação, na praia do Areão em Janeiro de 2014.

e WNW.

Por outro lado, ao longo de quase todo o troço registam-se aumentos de cotas de 1 a 2 metros junto à base da duna. Este aspecto está associado à acumulação de sedimentos provenientes do cordão dunar/dique arenoso que colapsaram após o mar ter erodido a base, contribuindo como fonte de sedimento para a praia emersa.

Ainda para o período de Outubro de 2013 a Fevereiro de 2014, observa-se que o grau de erosão não é o mesmo em todos os sectores, diminuindo para Sul e sendo o sector BCN o mais afectado. Este sector sofre dos efeitos de difração induzidos pelos molhes do porto de Aveiro; além disso, o efeito da erosão dos sectores litorais mais a Norte contribuem como fonte sedimentar para a corrente de deriva que, por conseguinte, evita maiores erosões a Sul. O EIA do projecto de reconfiguração da barra do porto de Aveiro (Atkins, 2009) refere que o prolongamento do molhe Norte provocará um aumento do défice de areias nas praias a Sul, devido a retenção, o que originará impactes sobre a geometria das praias. A estimativa do volume retido a Norte dos molhes, no âmbito deste estudo, é da ordem de  $500 \times 10^3 m^3$ . Além disso, assinala a zona da Costa Nova como a mais afectada com a concretização desta obra, razão pela qual foi a zona indicada para a deposição dos dragados, entre o 3º e o 5º esporões da Costa Nova. Contudo, não existem outras campanhas para o sector BCN onde seja possível comparar o comportamento da praia antes e depois da obra ou sem o efeito de temporais onde fosse possível quantificar a acção do prolongamento do molhe.

Quanto ao comportamento observado para o período de Fevereiro a Abril de 2014, a diminuição de cotas é pouco significativa observando, em geral, estabilização ou aumento das mesmas. No entanto, houve recuos consideráveis da linha de costa pelo que a variação observada pode estar associada aos sedimentos oriundos do cordão dunar e dos diques, erodidos por acção da ondulação. Apesar dos temporais que ocorreram entre Fevereiro e Abril de 2014, em todos os sectores analisados a praia apresenta ter condições para recuperar. Possivelmente, devido a condições de agitação marítima mais calmas em Março e Abril que contribuíram com sedimentos da praia submersa para a praia emersa, dando origem aos sistemas de crista-canal.



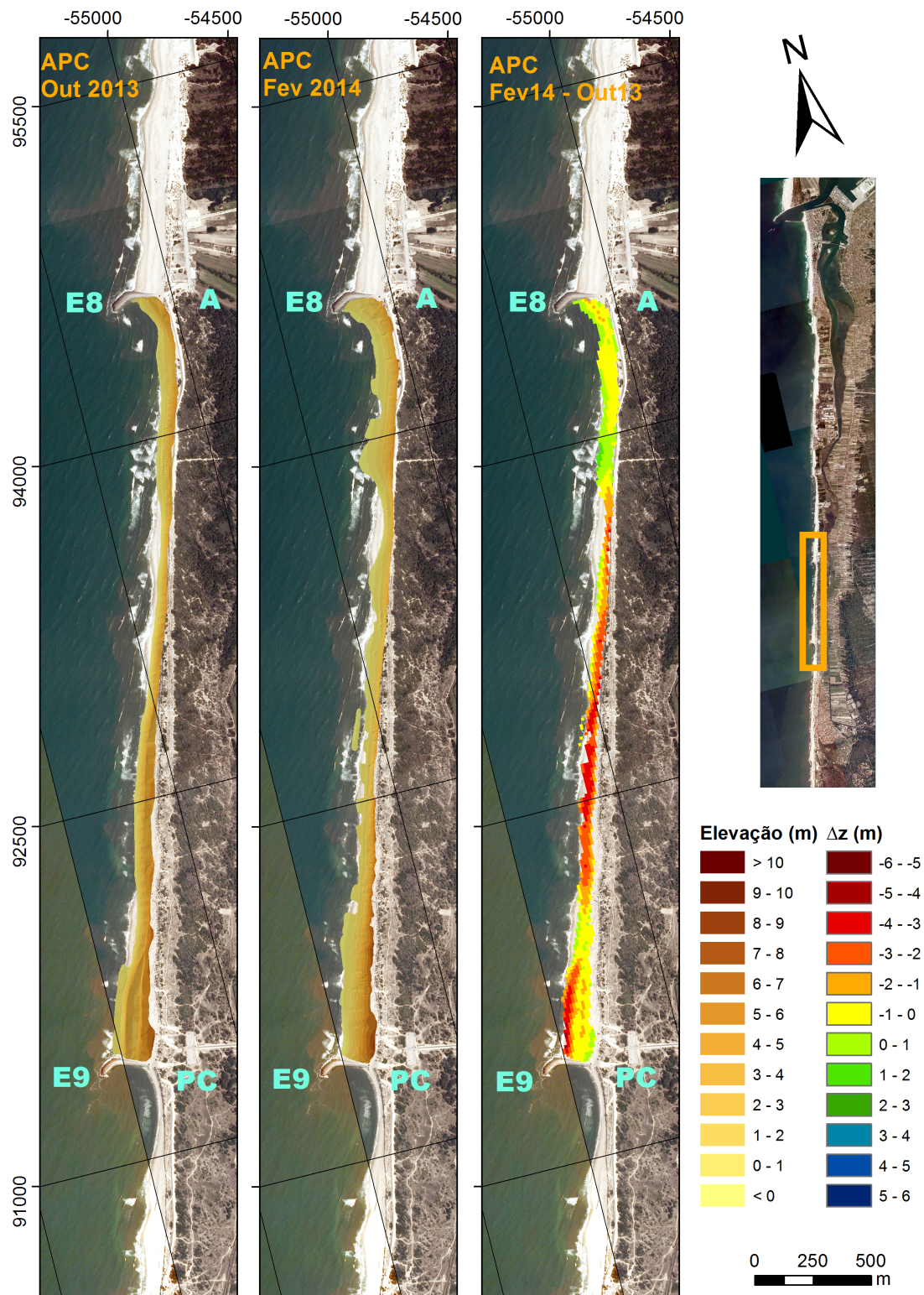


Figura 5.17: Evolução temporal da geomorfologia no sector APC para o período Outubro de 2013 a Fevereiro de 2014. Para o mapa das diferenças valores superiores a 0 m (verdes e azuis) correspondem a acreção e os valores inferiores a 0 m (amarelos e vermelhos) a erosão. A - Areão e PC - Poço da Cruz correspondem às localidades.



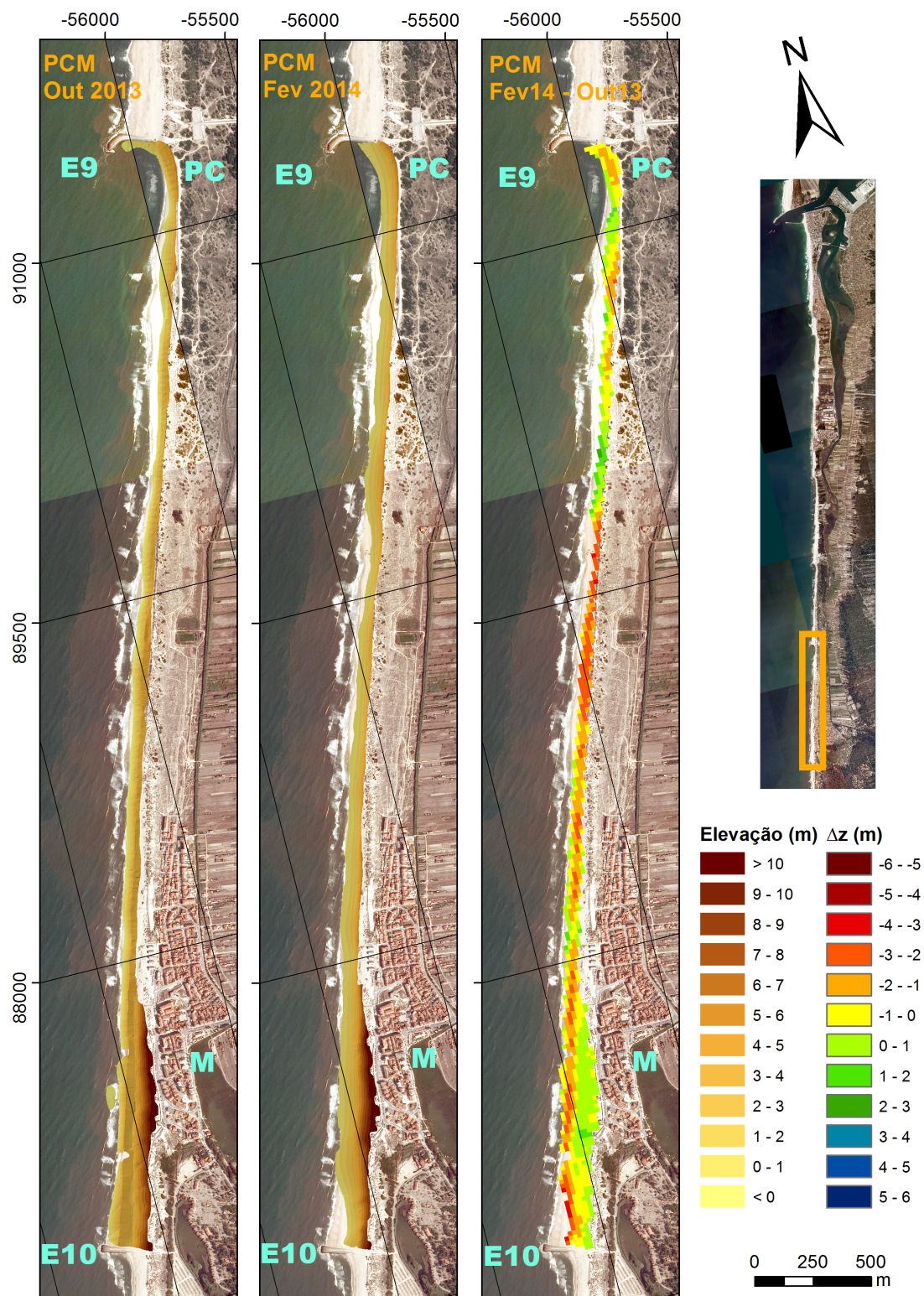


Figura 5.18: Evolução temporal da geomorfologia no sector PCM para o período Outubro de 2013 a Fevereiro de 2014. Para o mapa das diferenças valores superiores a 0 m (verdes e azuis) correspondem a acreção e os valores inferiores a 0 m (amarelos e vermelhos) a erosão. PC - Poço da Cruz e M - Praia de Mira correspondem às localidades.

## Praia Submersa

No sector da Barra à Vagueira, é possível observar as barras submersas, em frente à embocadura da laguna (Figura 5.19). A formação das barras de desembocadura está associada aos processos de transporte de sedimentos, representados na Figura 5.20, provocados pela presença dos molhes da barra do porto de Aveiro e pelas correntes da embocadura da laguna. De 2009 para 2012, a barra cresceu e sofreu uma migração em direcção à costa o que se pode observar pelo perfil batimétrico apresentado na Figura 5.21a.

Verificou-se um recuo da praia emersa e um aumento do declive, observado pela proximidade das curvas de nível, na zona de rebentação. No entanto, devido à baixa resolução espacial dos dados e à falta de informação na zona de rebentação, para os dados de 2009, não é possível ter a certeza, relativamente, ao comportamento observado. No prisma litoral a profundidade sofreu alterações pouco significativas, com tendência acrecionária até 1 m de altura.

No MDT de 2012, no início de profundidades representadas pelos tons azuis, cotas próximas de -6 m, observam-se variações que podem estar associadas à presença de barras submersas (Figura 5.19). Nos perfis de 2009 não aparece nenhum indício da presença de barras, sendo difícil inferir sobre a sua existência tendo em conta que os perfis adjacentes não contêm informação na zona correspondente. Em 2012 é visível uma barra submersa que vai desde a zona Sul da Costa Nova (perfil 6) até à frente urbana da Vagueira (entre os perfis 9 e 10) (Figura 5.21b). As dimensões da barra variam ao longo do sector, apresentando altura entre 1.1 m e 2.0 m e largura de 125.0 m a 200.0 m.

Entre 2009 e 2012 houve a deposição entre o 3° e 5° esporões da Costa Nova, numa zona submersa entre as cotas -2 m e -5 m (Z.H.), de  $1.32 \times 10^6 \text{ m}^3$  de material dragado da zona das valas de fundação dos taludes do prolongamento do molhe e da zona do canal de navegação. No mapa de diferenças entre as duas campanhas não é detectável variação de volume de sedimento. Por um lado, a área de análise é demasiado grande tendo em atenção o local de deposição dos dragados, além da resolução ser muito baixa, por outro, os sedimentos podem ter sido transportados pela corrente de deriva litoral, não contribuindo de forma significativa para a zona submersa e emersa neste sector.

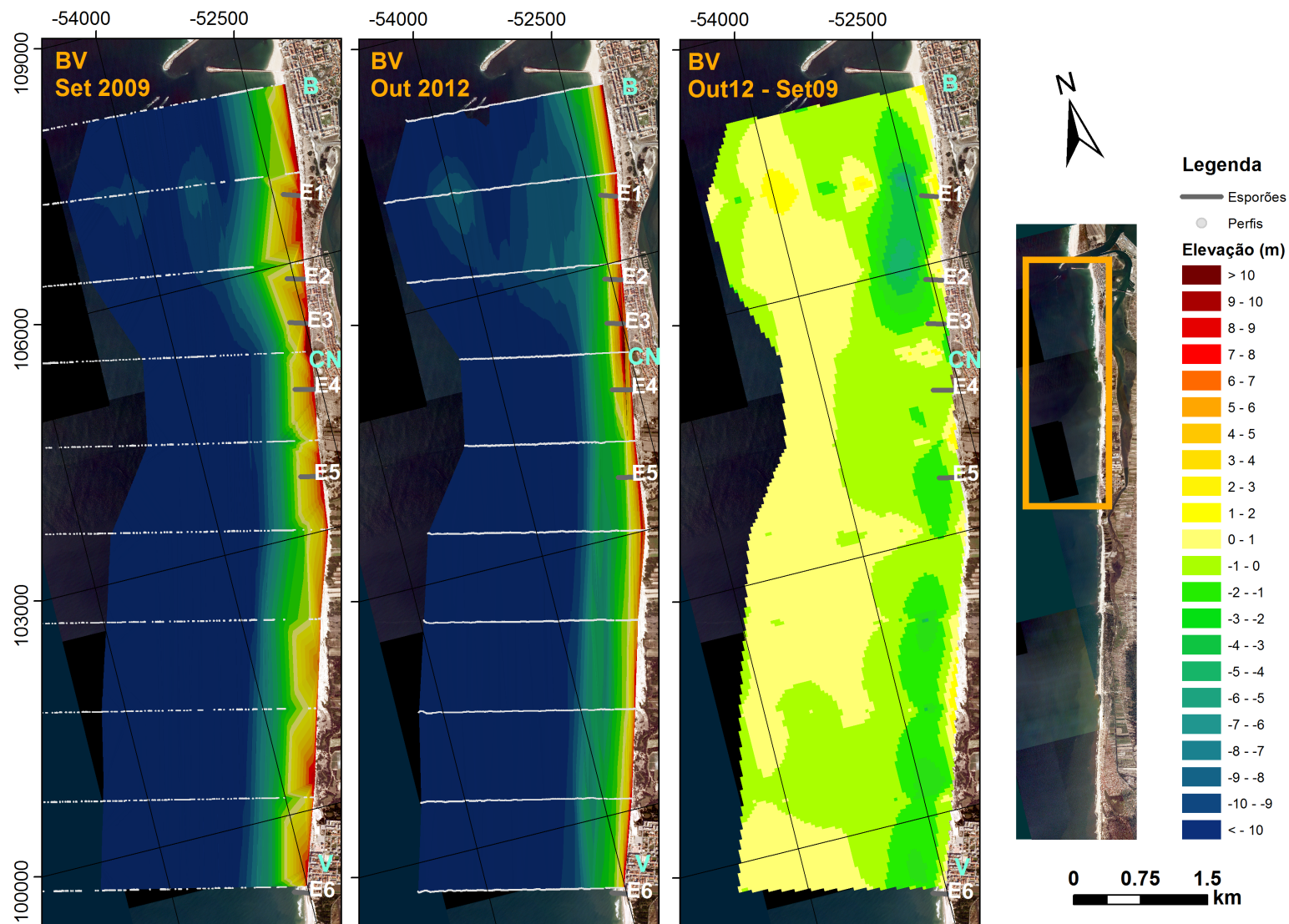


Figura 5.19: Evolução temporal da topo-batimetria do sector BV para o período Setembro de 2009 a Outubro de 2012. Para o mapa das diferenças valores superiores a 0 m (amarelos e vermelhos) correspondem a acreção e os valores inferiores a 0 m (verdes e azuis) a erosão. Os perfis estão numerados de Norte para Sul. B - Barra, CN - Costa Nova e V - Vagueira correspondem às localidades.





Figura 5.20: Processos de transporte de sedimentos em frente à Barra, por influência da embocadura da laguna (Atkins, 2009).

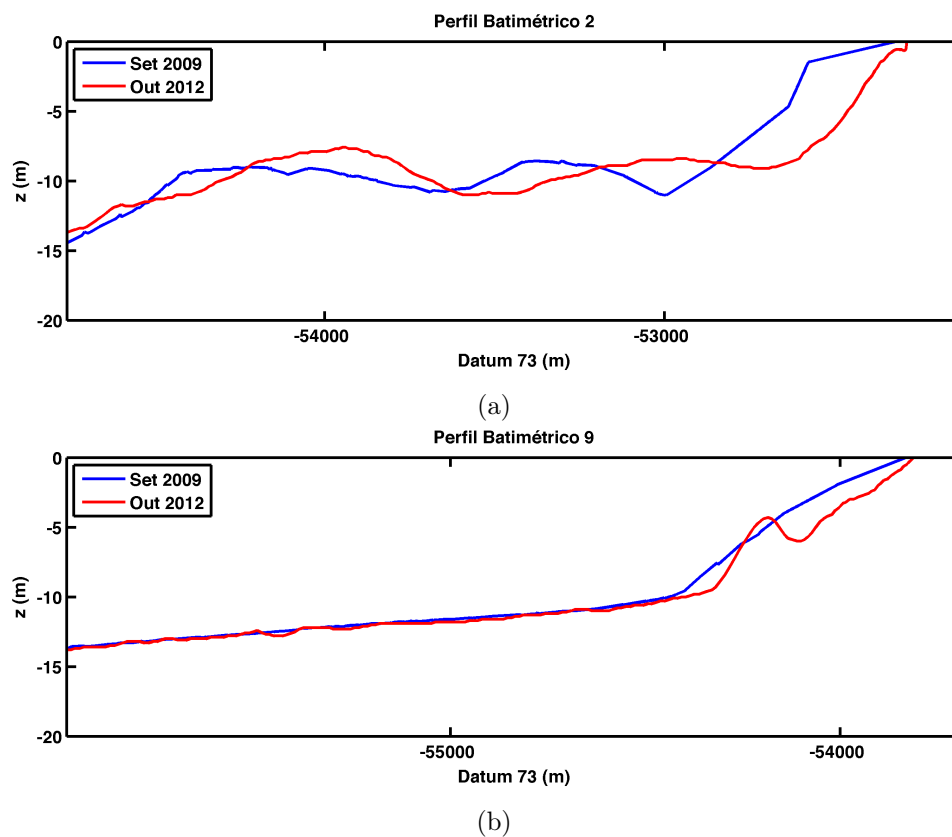


Figura 5.21: Perfis batimétricos localizados a) a Sul da zona urbana da Barra e b) a Norte da zona urbana da Vagueira, obtidos a partir do segundo e do nono perfis que constituem a grelha de pontos, dos dados topo-batimétricos do sector BV. Para localização dos perfis ver Figura 5.19.

Os MDTs para os sectores VA e PCM, relativos a Março de 2012 e Julho de 2013, apresentam irregularidades nas curvas de nível associadas à grelha de pontos que dá origem à TIN (Figura 5.22). Ao longo dos dois sectores observam-se variações pouco acentuadas entre 2012 e 2013 e a diferença de cotas varia entre -2 m e +3 m. Estas variações podem estar associadas à altura do ano em que foram realizadas as campanhas, no final do Inverno marítimo e durante o Verão, respectivamente, ou podem estar relacionadas com os sedimentos depositados na praia emersa junto à Costa Nova, uma vez que, de 2012 a 2013 foram depositados  $1.60 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

Contudo, são visíveis variações semelhantes às observadas no sector BV a profundidades próximas dos 6.0 m. A partir da representação gráfica dos perfis observa-se a presença de uma barra em praticamente todos os perfis de Março de 2012 para os dois sectores. Os perfis de Julho de 2013 são bastante variáveis uns dos outros: no perfil 1 identificam-se duas barras; noutros, 5 e 7, apenas se identifica uma barra (Figura 5.23).

No perfil de Julho de 2013 da Figura 5.23a, a barra interna tem 1.0 m de altura e 125.0 m de largura, enquanto a barra externa tem 0.5 m de altura e 140 m de largura. Nos restantes perfis, as barras apresentam dimensões que variam entre 0.8 m a 2.6 m de altura e entre 170.0 m e 230.0 m de largura, em 2012, e entre 0.6 m a 2.6 m de amplitude e largura de 170 m a 200 m, em 2013. Observando a evolução da barra de 2012 para 2013, esta sofreu uma migração para o largo. Como os perfis, entre 2012 e 2013, não estão exactamente sobrepostos, pode gerar estas diferenças na variação da posição da barra entre campanhas.

Os resultados obtidos para as dimensões da barra vão ao encontro dos perfis adquiridos por Ferreira (1993). Este autor refere que para Norte da Praia de Mira verifica-se uma diminuição das dimensões da barra e a existência de zonas onde esta é incipiente; além disso, para o mesmo sector, a amplitude da barra não ultrapassa os 3.0 m e a sua largura raramente excede os 400.0 m. Neste caso, a largura da barra não ultrapassa os 250.0 m.

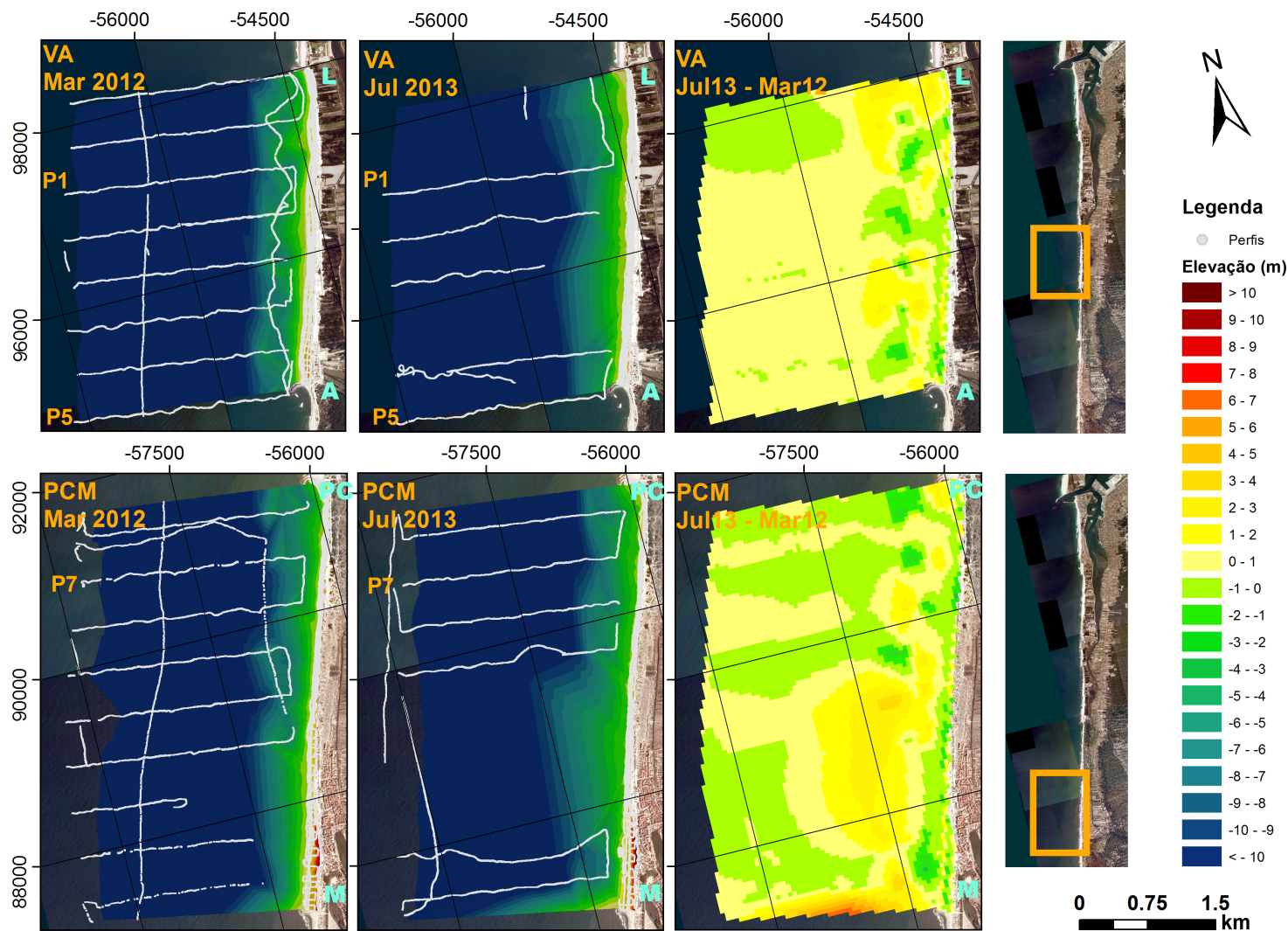
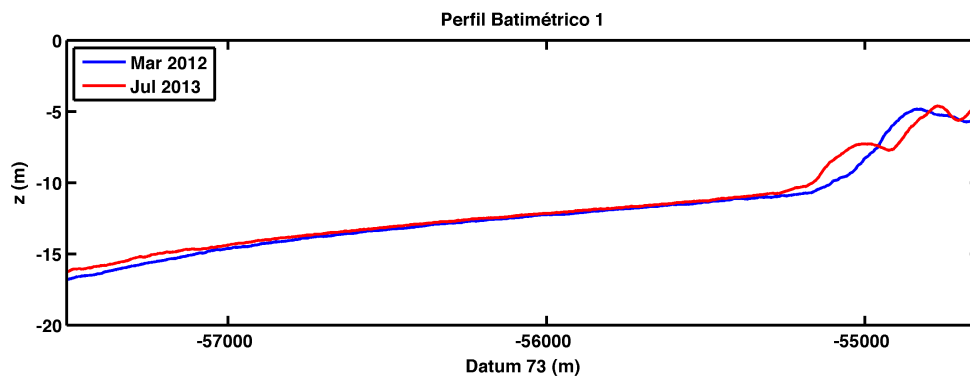
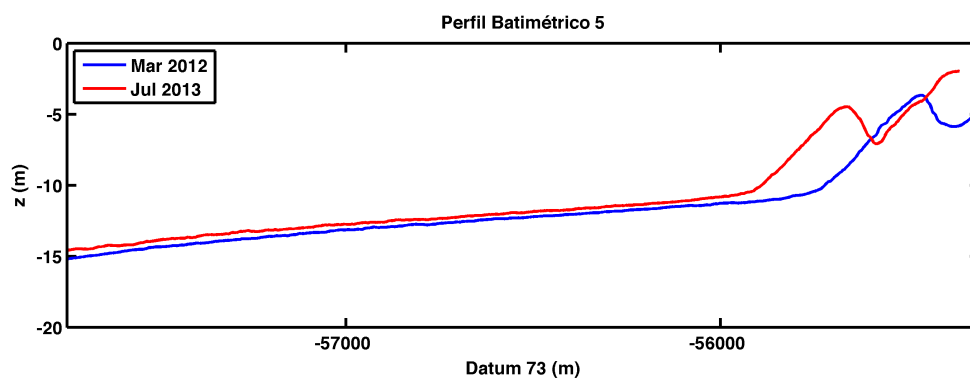


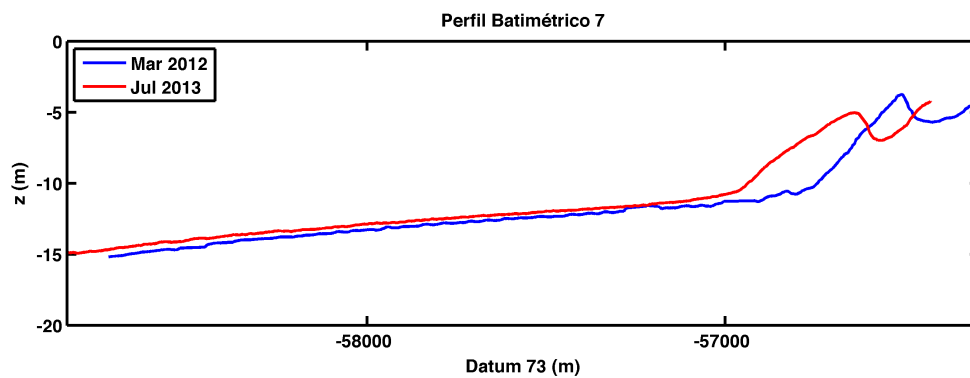
Figura 5.22: Evolução temporal da praia submersa dos sectores VA e PCM para o período Março de 2012 a Julho de 2013. Para o mapa das diferenças valores superiores a 0 m (amarelos e vermelhos) correspondem a acreção e os valores inferiores a 0 m (verdes e azuis) a erosão. L - Labrego, A - Areão, PC - Poço da Cruz e M - Praia de Mira correspondem às localidades.



(a) Sector VA



(b) Sector VA



(c) Sector PCM

Figura 5.23: Perfis batimétricos, localizados: a) a sotamar do esporão do Labrego, b) em frente ao esporão do Areão e c) a sotamar do esporão do Poço da Cruz; obtidos a partir dos perfis que constituem as grelhas de pontos, dos dados topo-batimétricos dos sectores VA e PCM. Para localização dos perfis ver Figura 5.22.

### 5.2.3 Balanço Sedimentar

Após a análise da variabilidade morfológica pretende-se determinar se há consistência desta com os balanços sedimentares. De seguida, serão apresentados os gráficos que retratam a variação de volume entre campanhas para cada sector. O volume foi calculado tendo em conta células com 100 m de comprimento que estarão representadas e numeradas à esquerda dos gráficos. O volume foi dividido pelo comprimento de cada célula para obter a variação de volume de sedimentos por metro linear de praia ( $m^3/m$ ).

#### Componente Longitudinal

Na Figura 5.24 é apresentada a variação de volume de sedimentos no sector BCN. Observa-se uma perda generalizada de volume em todo o sector e o único local onde se regista um balanço positivo é nos primeiros 400 m a sotamar do esporão E1. O volume sedimentar que aqui ficou depositado pode ter vindo das células a Sul que registam maior perda sedimentar, movidos para Norte pelos eventos de temporal de SSW. O balanço total corresponde a uma perda de  $-2.35 \times 10^5 m^3$ . Teria sido importante comparar os resultados com os de outras campanhas mas a ausência de dados impossibilita esse estudo.

No sector CNV, representado na Figura 5.25, observa-se uma forte perda sedimentar entre Novembro de 2003 e Janeiro de 2008. É preciso ter particular atenção ao analisar os balanços entre as células 9 e 22 nos conjuntos que envolvam o ano 2008 por causa dos limites da praia não estarem bem definidos. De um modo geral, pode-se dizer que entre 2003 e 2013 não se registaram aumentos significativos de volume.

Entre Outubro de 2013 e Fevereiro de 2014, apresentam-se casos pontuais onde ocorreu aumento do volume de sedimentos devido aos eventos de temporal que depositaram sedimentos onde normalmente se regista perda e, possivelmente, sedimentos erodidos da base da duna ou do dique. Em algumas células não houve variações significativas, sendo que as diferenças não são detectáveis nos gráficos, e o balanço total corresponde a  $-1.60 \times 10^5 m^3$ .

Entre 2009 e 2013 foram depositados  $2.92 \times 10^6 m^3$  entre o 3º e 5º esporões da praia da Costa Nova e o objectivo era que, com as condições propícias, estes sedimentos chegassem à praia emersa e fossem contribuir para a sua robustez. No entanto, não só não se verifica acreção significativa da praia, como esta ainda perdeu volume, apresentando uma tendência erosiva generalizada em todo o sector.

O sector VA junto ao esporão E7 tem apresentado um balanço positivo até à célula 5, em todos os períodos em estudo (Figura 5.26). Entre as células 5 e 29 houve uma perda significativa de volume para o período 2003-2008. Da célula 29 à 35 registou-se acreção entre 2003 e 2008 e entre 2008 e 2012, devido à retenção dos sedimentos no esporão E8, provavelmente, de sedimentos provenientes da parte Norte do sector. O balanço total do sector foi de  $-6.85 \times 10^4 m^3$ , de 2003 a 2008, e de  $5.49 \times 10^4 m^3$  de 2008 a 2012. O esporão do Areão foi construído em 2003 e a acreção sedimentar a barlar pode ter-se começado a fazer sentir a partir deste período. Por outro lado, a acreção observada do primeiro para o segundo intervalo pode estar associada com a rotação da direcção da ondulação para NW que favoreceu a acumulação sedimentar a barlar. De 2012 até à actualidade, a tendência tem sido de perda de sedimentos, tendo sido de  $-7.90 \times 10^4 m^3$  entre Março de 2012 e Outubro de 2013. Neste período houve uma rotação para WNW da direcção da ondulação associada a maiores alturas

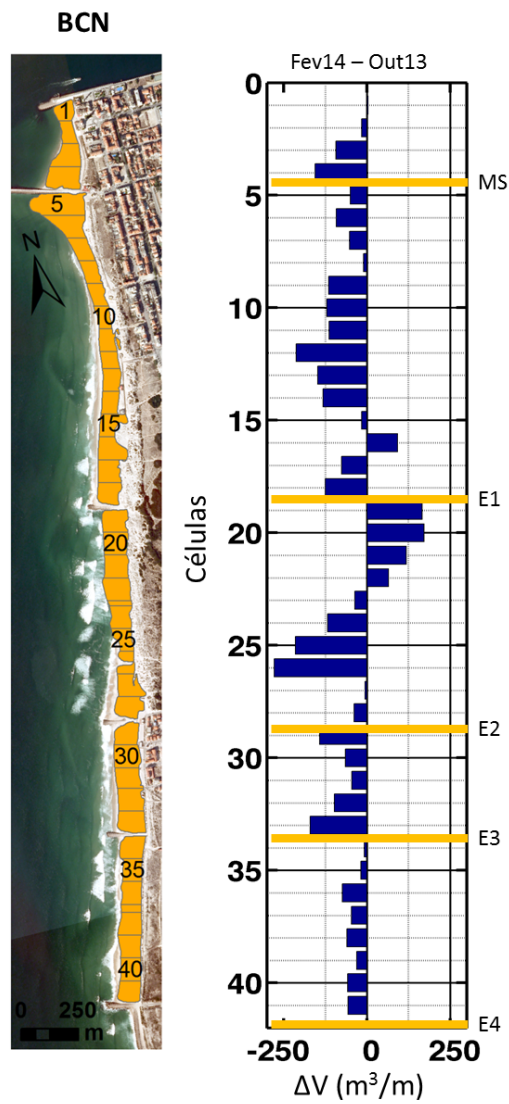


Figura 5.24: Variação de volumes absolutos ao longo do sector BCV para o período Outubro de 2013 - Fevereiro 2014. As barras amarelas indicam a localização de obras transversais (MS - Molhe Sul, E1 a E4 - Esporão nº1 ao Esporão nº4).

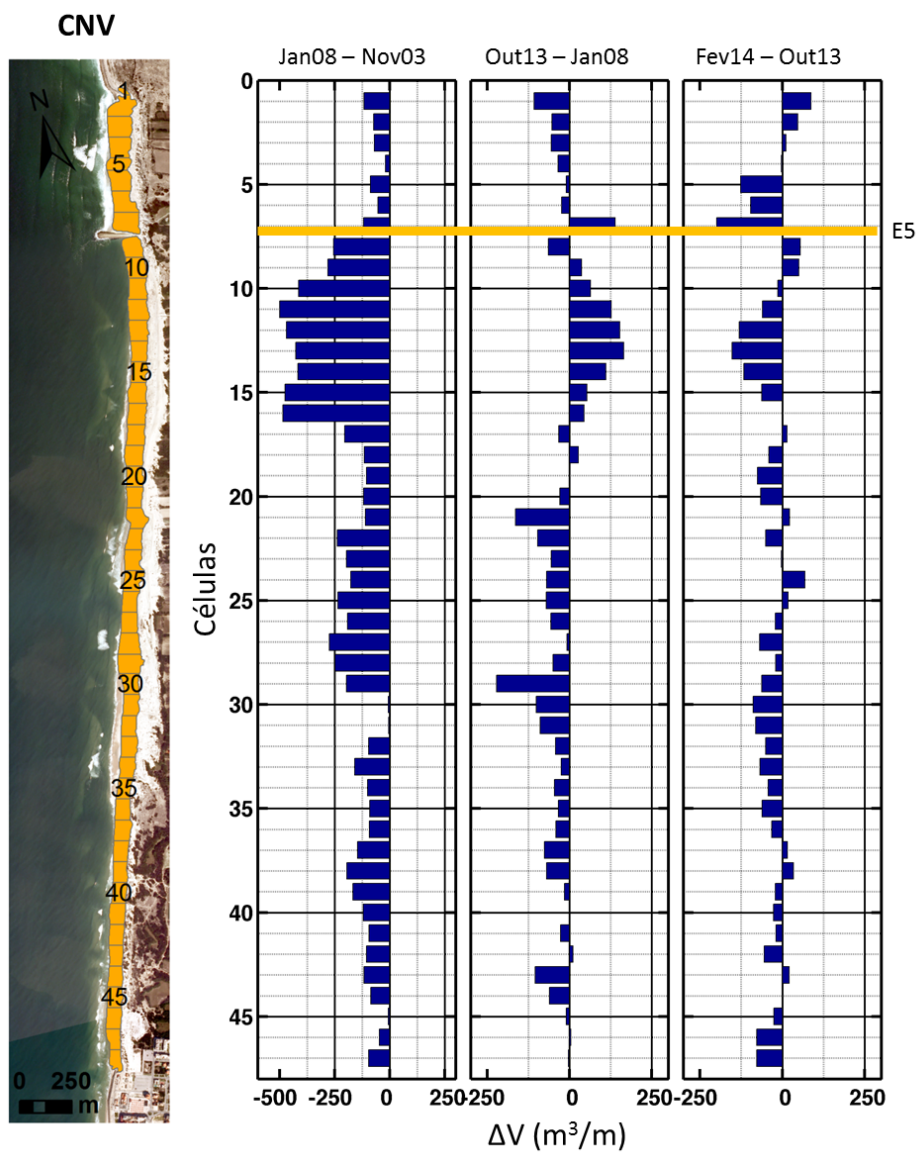


Figura 5.25: Variação de volumes absolutos ao longo do sector CNV para os vários períodos de análise. As barras amarelas indicam a localização de obras transversais (E5 - Esporão nº5). Deve-se ter em atenção a escala horizontal que não é a mesma para os três gráficos.



da ondulação.

De 2013 a 2014 houve, novamente, perda relevante em volume de sedimentos; os registos positivos observados não compensam as perdas, obtendo um balanço total neste período de  $-1.35 \times 10^5 m^3$ . Comparativamente aos valores obtidos para escalas temporais mais alargadas, a ordem de grandeza do volume perdido em 4 meses é muito superior.

Entre Fevereiro e Abril de 2014, algumas zonas conseguiram recuperar algum volume após os temporais que ocorreram no Inverno; contudo, dado o aumento pouco relevante de sedimentos associado ao recuo da linha de costa verificado na Figura 7, sugere-se que o volume seja proveniente dos diques arenosos. Porém, o balanço regista perdas de apenas  $-2.83 \times 10^3 m^3$  comparativamente a outros intervalos.

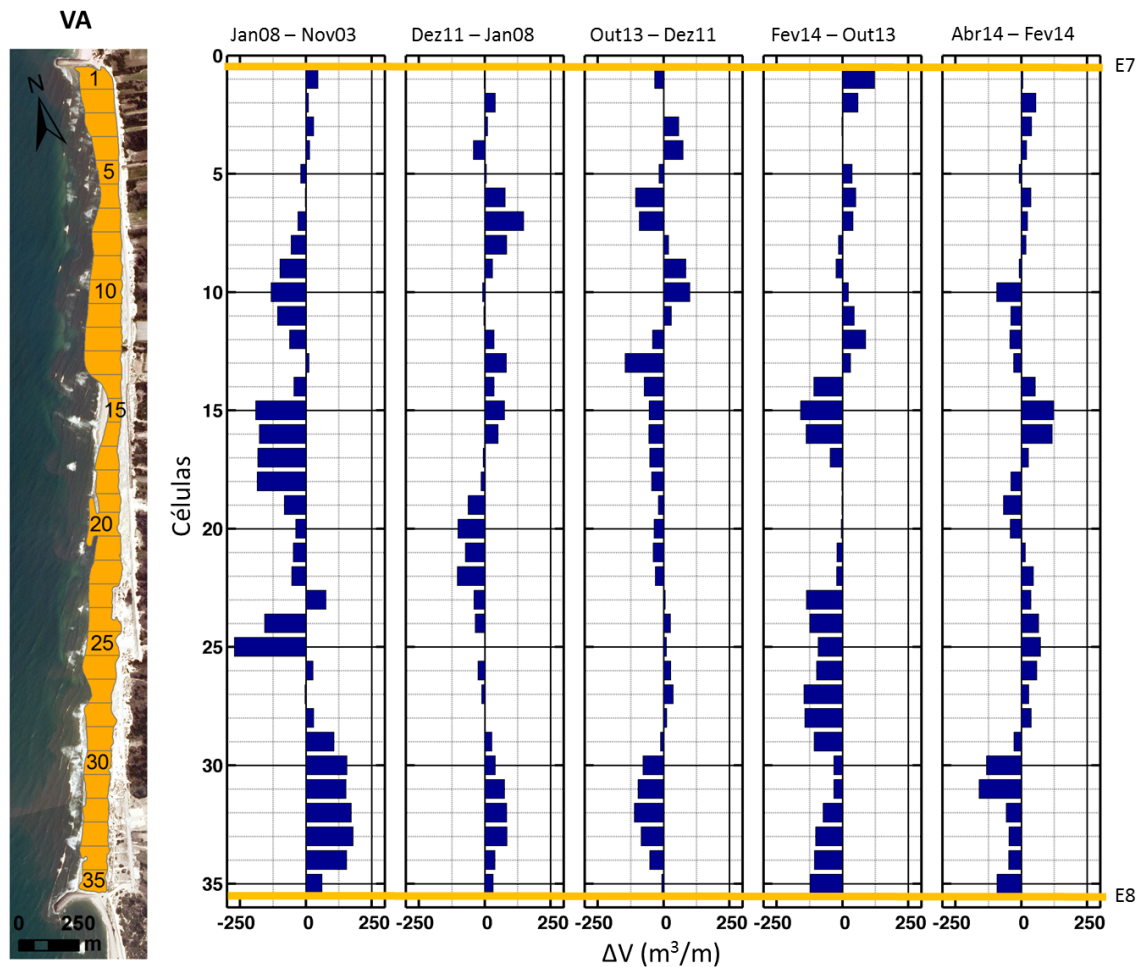


Figura 5.26: Variação de volumes absolutos ao longo do sector VA para os vários períodos de análise. As barras amarelas indicam a localização de obras transversais (E7 e E8 - Esporão n°7 e Esporão n°8).

Entre as praias do APC verificou-se perda de volume entre 2003 e 2008 até à célula 20, contudo pouco relevante; da célula 20 para Sul há registo de aumento idem de volume devido a retenção dos sedimentos no esporão E9; o sector apresentou um balanço positivo de  $1.74 \times$



$10^5 \text{ m}^3$  (Figura 5.27). É possível que esse balanço sedimentar positivo esteja relacionado com erosão do cordão dunar frontal em associação com sedimentos transportados por deriva litoral os quais foram ao longo do período em estudo colmatando o esporão do Poço da Cruz (limite a barlar de este sector).

De 2008 a 2013 houve acreção nos primeiros 600 m a sotamar do esporão do Areão, favorecida pela geometria da estrutura. Para Sul observa-se uma tendência erosiva que se intensifica a partir da célula 24. O volume ganho de 2003 a 2008 foi perdido neste intervalo (2008 - 2013), sendo o balanço de  $-1.72 \times 10^5 \text{ m}^3$ .

Entre 2013 e 2014, a metade Norte do sector apresenta aumento de volume, enquanto a Sul se observa diminuição. Este comportamento está associado aos eventos de temporal registados, sendo o volume ganho a Norte proveniente do volume erodido a Sul. Por outro lado, de Fevereiro a Abril de 2014, observou-se o sentido comum no transporte de sedimentos, estando o volume depositado a Sul, associado ao que se perdeu a Norte no sector. O balanço total registado foi de  $-3.79 \times 10^4 \text{ m}^3$ , de Outubro de 2013 a Fevereiro de 2014, e de  $-2.84 \times 10^4 \text{ m}^3$  de Fevereiro a Abril de 2014.

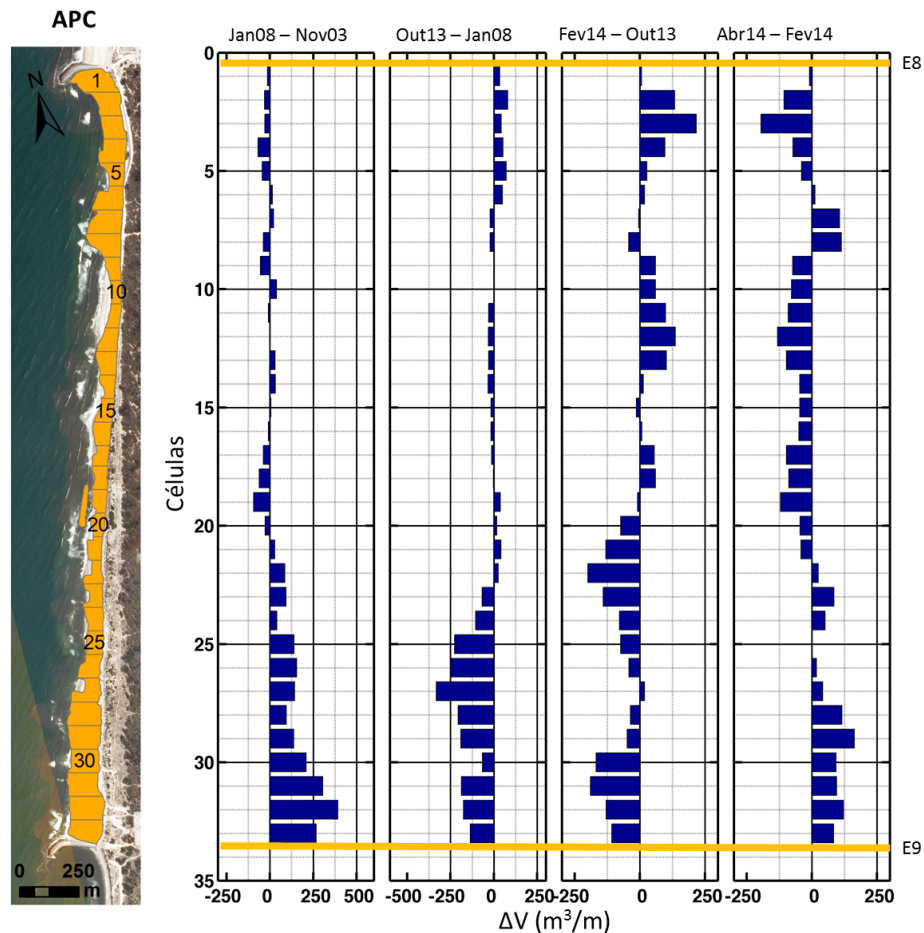


Figura 5.27: Variação de volumes absolutos ao longo do sector APC para os vários períodos de análise. As barras amarelas indicam a localização de obras transversais (E8 e E9 - Esporão nº8 e Esporão nº9). Deve-se ter em atenção a escala horizontal que não é a mesma para os quatro gráficos.

O balanço sedimentar para o sector PCM, apresentado na Figura 5.28, regista acentuada perda sedimentar entre Novembro de 2003 e Janeiro de 2008, com alguns registos de acreção a Sul. De 2008 a 2012 observa-se algum aumento de volume na parte Norte com perda a Sul. As diferenças entre o primeiro e o segundo intervalo podem ser atribuídas à propagação dos efeitos induzidos pelo esporão na erosão do cordão dunar para alimentar a praia a barlar do esporão da Praia de Mira. Por outro lado, a Norte, o balanço positivo que se verifica deveu-se ao acentuado recuo da linha de costa e à acumulação dos sedimentos provenientes do cordão dunar que foram realimentar a praia após a sua rotação. No primeiro período houve perda de  $-2.04 \times 10^5 \text{ m}^3$ , enquanto no período seguinte, de 2008 a 2012, a perda foi menor  $-1.12 \times 10^5 \text{ m}^3$ .

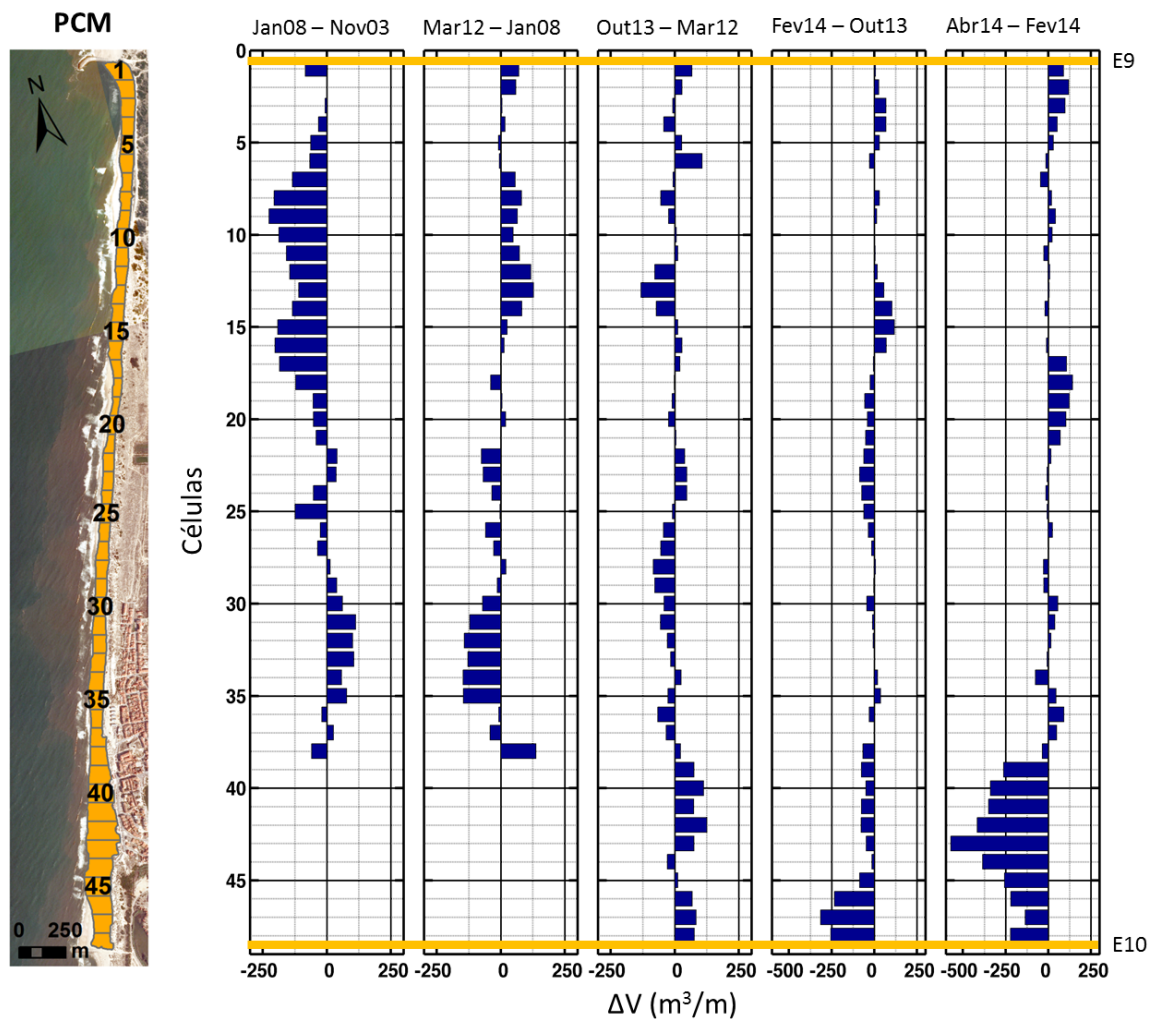


Figura 5.28: Variação de volumes absolutos ao longo do sector PCM para os vários períodos de análise. As barras amarelas indicam a localização de obras transversais (E9 e E10 - Esporão nº9 e Esporão nº10).

Entre 2012 e 2013 há variações pontuais de aumento e diminuição de volume. A partir da célula 38 observa-se aumento de volume que se deve à retenção dos sedimentos de deriva pelo esporão E10. Tendo-se registado um ganho de  $1.84 \times 10^5 \text{ m}^3$  no intervalo de um ano.

De Outubro de 2013 a Fevereiro de 2014 o local onde há maior perda de volume é a barlarar do esporão E10, seguida da zona localizada a meio do sector. O aumento de volume que se regista mais a Norte deve-se, provavelmente, aos sedimentos erodidos a Sul que devido à ondulação de W e WSW foram depositados mais a Norte.

Entre Fevereiro e Abril de 2014 observa-se um aumento de volume em quase todo o sector, até à célula 37, que atinge  $125.00 \text{ m}^3/\text{m}$  (Figura 5.28). A acentuada perda volumétrica que se regista a Sul não é real, uma vez que o limite interior da praia não é o mesmo (Figura 9). Por alguma razão, na campanha de Abril não foi possível chegar à zona superior em frente à povoação da Praia de Mira e por isso a praia aparenta estar mais estreita e com menos volume, não sendo possível tirar conclusões sobre o balanço sedimentar para este local.

As perdas mais significativas ocorreram para os dois últimos períodos, onde se perdeu mais de  $3.20 \times 10^5 \text{ m}^3$ , enquanto nos últimos 10 anos o balanço total foi de  $-2.00 \times 10^5 \text{ m}^3$ .

Verificou-se ao longo de quase todos os setores que as variações volumétricas obedecem a um padrão de variação sinusoidal no qual a erosão está intercalada com acreção. Este efeito deve-se à presença de barras transversais rítmicas, as quais migram ao longo da componente longitudinal da praia, induzindo variações de largura e consequente volume de praia.

Determinando o balanço para cada sector e tendo em atenção toda a série de dados, o sector CNV foi o que mais perdeu, com um balanço negativo de cerca de 1 milhão de  $\text{m}^3$ . No entanto, é de salientar que a diferença de volumes obtida para 2003 - 2008 não está muito correcta influenciando o balanço para o intervalo correspondente (Tabela 5.11).

Tabela 5.11: Balanço sedimentar para cada sector e para cada intervalo analisado ( $\times 10^4 \text{ m}^3$ ).

Ano	2003-2008	2008-2013	2013-2014	Fev-Abr 2014	$\Sigma$
BCN			-23.47		-23.47
CNV	-83.69	-10.10	-16.03		-109.82
VA	-6.85	-2.41	-13.53	-0.28	-23.08
APC	17.43	-17.17	-3.79	-2.84	-6.37
PCM	-20.35	0.73	-12.31	-20.77	-52.70
$\Sigma$	-93.46	-28.95	-69.13	-23.89	-215.43

Ocasionalmente, foram realizadas realimentações artificiais e foram extraídos sedimentos da praia para a construção de diques, no entanto, há falta de informação e de dados nesse sentido. Outro factor importante que provoca variações na morfologia e no volume de sedimentos da praia é a erosão do dique arenoso/cordão dunar por acção da agitação marítima ou remobilização dos sedimentos por acção do vento. Todas estas variáveis contribuíram para a determinação do balanço sedimentar, porém, muitas destas intervenções foram realizadas de emergência e não foram contabilizados os volumes usados ou os mesmos não se encontram disponíveis.

### Componente transversal

Para os MDT obtidos com os dados topo-batimétricos calculou-se o volume da praia emersa e da praia submersa, separadamente, e respectivo balanço. Os resultados são apresentados na Tabela 5.12.

Relativamente à praia emersa, o balanço foi negativo para o sector BV em mais de 3 milhões de metros cúbicos de sedimentos. Este valor está relacionado com as perdas observadas na

praia emersa na análise de 2009 a 2012; no entanto, este valor apresenta erros associados à grelha de 2009 e à própria resolução dos dados. Como, também, não há informação da topografia para a mesma altura do sector BCN não é possível comparar as perdas.

Para o sector VA a praia emersa perdeu 84 000  $m^3$ , o que corresponde a uma perda de 24.00  $m^3/m$ . Comparando com a informação topográfica cujo balanço é de -79 000  $m^3$  (22.60  $m^3/m$ ), existe uma diferença de 1.40  $m^3/m$ . Para o sector PCM, a praia emersa ganhou 23 000  $m^3$  de sedimentos, o que corresponde a mais 5 000  $m^3$  comparativamente ao balanço obtido pelos dados topográficos, representando uma diferença de 1.00  $m^3/m$ . Esta diferença poderá estar associada com a zona sem informação entre os dados topográficos e batimétricos que na criação da TIN procede a uma extrapolação.

Os balanços obtidos para a praia submersa são positivos para os três sectores. O volume pode ser proveniente dos sedimentos erodidos da praia emersa, e do volume depositado na praia submersa proveniente da deposição dos dragados. Além disso, pode haver deposição dos sedimentos que vêm na corrente de deriva litoral.

Tabela 5.12: Balanço sedimentar da praia emersa e da praia submersa para cada sector e diferentes anos.

Volume da praia emersa ( $\times 10^6 m^3$ )					Volume da praia submersa ( $\times 10^6 m^3$ )				
Sector	Ano			Balanço	Sector	Ano			Balanço
	2009	2012	2013			2009	2012	2013	
BV	8.42	5.12	-	-3.30	BV	90.18	98.77	-	8.59
VA	-	0.86	0.78	-0.08	VA	-	37.94	40.49	2.54
PCM	-	1.18	1.19	0.02	PCM	-	48.87	52.96	4.09



## Capítulo 6

# Conclusão e Considerações Finais

### 6.1 Conclusão

A faixa litoral estudada é constituída por 22 km de praias arenosas, bastante expostas às condições de agitação marítima e de elevado risco à erosão costeira. A zona está inserida num segmento costeiro onde a pressão urbana excessiva levou a uma artificialização do mesmo, o que contribuiu para uma diminuição do transporte sedimentar pela deriva litoral que a afecta particularmente.

A caracterização da agitação marítima, realizada a partir de dados simulados e validados e os registados pela bóia de Leixões, mostra que a direcção predominante da ondulação é de NW, em qualquer altura do ano, enquanto a ondulação do quadrante W e SW concentra-se nos meses de Inverno. As alturas de onda significativa entre 1 e 2 m correspondem a 45 % dos casos. Relativamente ao período médio da onda, os valores mais frequentes estão compreendidos entre 6 e 7 s, enquanto para o período de pico estão entre 9 e 10 s. Além disso, verificou-se o padrão mensal existente para a altura significativa, período de pico e período médio: registaram-se alturas de onda significativa e períodos mais baixos nos meses de Verão e mais altos nos meses de Inverno; as classes mais altas apenas apresentaram registos no Inverno marítimo.

Na definição de eventos de temporal houve dificuldade em estabelecer critérios, uma vez que cada autor utiliza critérios em função das características energéticas das zonas em estudo. Nesse sentido, optou-se por parâmetros que considerassem o comportamento da agitação marítima para a série analisada e não critérios que considerem eventos de temporal quando a altura de onda significativa é superior a um valor pré-estabelecido. O critério aplicado considerou eventos de temporal quando as alturas significativas da onda são superiores a 4.34 m e a duração do evento enquanto a altura é superior a 3.22 m. O ano que registou mais eventos de temporal foi o de 2013 (21 eventos), enquanto o menor foi 2012 (7 eventos), relativamente à média, 15.30 eventos por ano, para o período em estudo. Registou-se, ainda, um aumento do número de eventos e persistência destes, aspecto relevante na variabilidade morfológica das praias. Os meses do ano com maior número de eventos são Janeiro, Fevereiro, Novembro e Dezembro, enquanto os meses com menor número são os de Junho a Agosto. O intervalo com maior número de dias de temporal foi de Fevereiro a Abril de 2014, com mais de 66 % dos dias, tendo-se registado 8 eventos e com a altura significativa máxima de toda a série. Os temporais são normalmente provenientes dos rumos NW e WNW. Os resultados obtidos registaram uma rotação para NW na direcção média da ondulação comparativamente ao estudo

de Coelho (2005). É admissível uma intensificação da erosão litoral não apenas devido aos eventos de temporal mas, porque uma ligeira rotação (para NW) na direcção da ondulação, leva a um aumento da velocidade da corrente de deriva litoral que, por sua vez, contribui para o aumento da erosão.

A variabilidade morfológica observada na última década revelou o impacto que as estruturas de protecção transversais à costa têm sobre a mesma. A sotamar dos esporões as praias são estreitas e apresentam quase sempre um perfil dissipativo ou intermédio, associado à pouca disponibilidade de sedimentos. A barlar dos esporões as praias apresentavam-se mais largas, por vezes, com bermas bem desenvolvidas. Nas campanhas realizadas nos períodos de transição são comuns os sistemas de crista - canal e algumas cúspides.

Na análise temporal mais alargada, não foi possível quantificar os processos com implicações nos balanços sedimentares. A caracterização dos eventos de temporal, o volume de sedimentos retirados da praia para a (re)construção de diques ou o volume introduzido para a realimentação da praia contribuíram decerto para o balanço sedimentar mas cuja informação não foi considerada ou é desconhecida.

Na evolução recente observou-se, entre Outubro de 2013 e Fevereiro de 2014, um padrão pouco comum a nível morfológico que se confirmou nos balanços sedimentares. Devido à ondulação de W e WSW que induziu uma inversão no sentido do transporte de sedimentos provocando erosão onde, em situações normais ocorre acreção. O sector que mais sofreu neste período foi o da Barra à Costa Nova, provavelmente, não só devido aos eventos de temporal mas, também, ao efeito "reflector" dos molhes que protegem a entrada da barra. No entanto, como apenas existe uma série de dados para este sector, não foi possível tirar conclusões mais precisas.

De Fevereiro a Abril de 2014 verificou-se o comportamento normal no transporte de sedimentos e recuos significativos da linha de costa em consequência dos temporais ocorridos em Fevereiro e Março. O sector onde se observou maior perda de volume de sedimentos foi do Poço da Cruz à Praia de Mira, no qual o cordão dunar se encontrava muito fragilizado e por conseguinte com menor capacidade de alimentar esse troço costeiro (no qual ainda não tinha sido edificado um dique arenoso). Nos outros sectores, a perda de volume foi menor devido aos sedimentos provenientes da erosão das dunas e dos diques arenosos.

Na análise dos resultados da praia submersa, as variações são pouco relevantes, registando-se o crescimento das barras de desembocadura junto ao canal de acesso à laguna de Aveiro. O balanço sedimentar foi positivo para os três sectores da praia submersa devido, provavelmente, à emersão de  $2.90 \times 10^6 \text{ m}^3$  de sedimentos provenientes do aprofundamento do canal de navegação e dos sedimentos provenientes da praia emersa. Avaliando os perfis batimétricos identificou-se a presença de barras submersas, com dimensões que vão até 2.5 m de altura e 250 de largura. Contudo, estas não são contínuas havendo zonas onde são inexistentes.

O sector BCN não tem sido alvo de monitorização continuada, possivelmente, por se achar que beneficiava da protecção dos molhes e da barra exterior. Teoricamente, os molhes proporcionariam a este trecho abrigo por difracção das ondas do quadrante N e a barra induziria, por rebentação, a agitação de maior altura. No entanto, pelo que se verificou, o sector BCN sofre bastante erosão verificada no período analisado; este comportamento pode ter sido apenas devido às situações de temporal mas, para tirar mais conclusões será importante obter mais informação no futuro. O sector CNV é altamente influenciado pelas dragagens no canal de navegação e pelo prolongamento dos molhes para fixação da embocadura. No sector da Vagueira à Praia de Mira, apesar de não existirem frentes urbanas a preservar, os recuos que se têm vindo a observar poderão causar rupturas na barreira (Quevedo *et al.*, 2011).

Comparando a evolução da última década com a evolução recente, foi possível concluir que as variações morfológicas são menos significativas para uma escala temporal mais larga, o que permite concluir que, de um modo geral, as condições médias de agitação contribuem para atenuar os efeitos de eventos extremos. De referir a este propósito que a perda de sedimentos que se verificou ao longo do Inverno marítimo de 2013 - 2014 (evolução recente) é mais de dois terços do balanço observado nos últimos 10 anos ( $1.22 \times 10^6 \text{ m}^3$ ); tal facto, mais uma vez, pode ser atribuído à situação atípica do último Inverno.

## 6.2 Considerações Finais

À luz dos resultados obtidos, o autor considera que os objectivos definidos inicialmente para esta dissertação foram atingidos, permitindo a identificação dos locais mais sensíveis à erosão e contribuir para propósitos de gestão litoral mais eficiente.

É evidente, também, a importância da monitorização regular no estudo do comportamento do sistema costeiro e dos impactes da extensão dos molhes de acesso ao porto de Aveiro, a este procedimento deve-se considerar os efeitos da propagação local da agitação, para compreender melhor o impacto do prolongamento do molhe Norte.

Como trabalhos futuros, propõe-se:

- A realização de campanhas de campo antes e após eventos de temporal de modo a compreender melhor a influência das condições de agitação marítima na morfologia das praias;
- A inclusão de dados fiáveis relativos ao volume dos sedimentos colocados nas praias (emersa e submersa) e que justifiquem os balanços sedimentares observados;
- Estudo do efeito da variabilidade da corrente de deriva litoral na morfologia das praias.





# Bibliografia

- Abrantes, M. (2005). *Os sedimentos da margem continental, sector Espinho - Cabo Mondego*. Tese de doutoramento, Universidade de Aveiro, Aveiro, 239 p.
- Almeida, L., Ferreira, O., Voudoukas, M., & Dodet, G. (2011). Historical variation and trends in storminess along the Portuguese South Coast. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(9):2407–2417.
- Atkins (2009). *Estudo de impacte ambiental do projecto de reconfiguração da barra do porto de Aveiro*. Relatório técnico, Administração do Porto de Aveiro, S.A., Aveiro, 401 p.
- Baptista, P. (2006). *O sistema de posicionamento global aplicado ao estudo de litorais arenosos*. Tese de doutoramento, Universidade de Aveiro, Aveiro, 278 p.
- Baptista, P., Coelho, C., Pereira, C., Bernardes, C., & Veloso-Gomes, F. (2014). Beach morphology and shoreline evolution: Monitoring and modelling medium-term responses (Portuguese NW coast study site). *Coastal Engineering*, 84:23–37.
- Baptista, P., Cunha, T., Matias, A., Gama, C., Bernardes, C., & Ferreira, O. (2011). New land-based method for surveying sandy shores and extracting DEMs: the INSHORE system. *Environmental monitoring and assessment*, 182(1-4):243–57.
- Bento, A., Rusu, E., & Soares, C. (2009). Modelação da agitação marítima ao largo do Porto de Leixões. *6º Simposio sobre el Margen Ibérico Atlántico*, pp: 241–244.
- Berg, C. (2008). *Validation of the WAM-model over the Baltic Sea*. Tese de mestrado, Institutionen för geovetenskap, Uppsala, 30 p.
- Bernardes, C. & Baptista, P. (2011). Evolução recente da barreira arenosa de aveiro. *Actas das Jornadas da Ria de Aveiro*, pp: 17–22.
- Bettencourt, P. & Ângelo, C. (1992). Faixa costeira Centro Oeste (Espinho-Nazaré): Enquadramento geomorfológico e evolução recente. *Genovas Especial: A Geologia e o Ambiente*, 1:7–30.
- Birkemeier, W. (1985). Field data on seaward limit of profile change. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 111(3):598–602.
- Boto, A. (1997). *Evolução da zona costeira entre a Costa Nova do Prado e o Areão*. Tese de mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, 209 p.
- Bowen, A. & Inman, D. (1966). Budget of littoral sands in the vicinity of Point Arguello, California. *Technical Memorandum 19*, 45 p.

- Caetano, P. (2002). *Análise fotointerpretativa da evolução da linha de costa e morfologias dunares entre o Furadouro e a Praia de Mira*. Tese de mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, 86 p.
- Capelo, E. (2012). *Evolução do setor adjacente ao quebra-mar destacado da praia da Aguda*. Tese de mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, 68 p.
- Coelho, C. (2005). *Riscos de exposição de frentes urbanas para diferentes intervenções de defesa costeira*. Tese de doutoramento, Universidade de Aveiro, Aveiro, 404 p.
- Comissão Europeia - CE (1999). Para uma Estratégia Europeia de Gestão Integrada das Zonas Costeiras. *Princípios Gerais e Opções Políticas*, 32 p.
- Correia, F., Ferreira, O., & Dias, J. (1997). Contributo das arribas para o balanço sedimentar do sector costeiro Quarteira - Vale do Lobo (Algarve - Portugal). *Seminário sobre a zona Costeira do Algarve*, pp: 31–39.
- Costa, M., Silva, R., & Vitorino, J. (2001). Contribuição para o Estudo do Clima de Agitação Marítima na Costa Portuguesa. 20 p.
- Cunha, P. & Dinis, J. (1998). A erosão nas praias do Cabo Mondego à Figueira da Foz (Portugal Centro-Oeste), de 1995 a 1998. *Territorium*, 5:31–50.
- Davidson-Arnott, R. (2010). *Introduction to coastal processes and geomorphology*. Cambridge University Press, New York, 2ª edição, 458 p.
- Decreto-Lei n.º 46/89 (1989). Decreto-Lei n.º 46/89 de 15 de Fevereiro do Ministério do Planeamento e da Administração do Território. Disponível em: [www.dre.pt](http://www.dre.pt).
- Dias, J. (2004). A História da evolução do litoral português nos últimos vinte milénios. *Evolução Geohistórica do Litoral Português e Fenómenos Correlativos: Geologia, História, Arqueologia e Climatologia*, pp: 157–170.
- Dias, J. (2007). Glossário das zonas costeiras. Disponível em: <http://www.aprh.pt/rgci/glossario/praias.html> [Consultado em 9 de Julho de 2014].
- Dias, J., Ferreira, O., & Pereira, A. (1994). *Estudo sintético de diagnóstico da geomorfologia e da dinâmica sedimentar dos troços costeiros entre Espinho e Nazaré*. Universidade do Algarve, Lisboa, 303 p.
- Diogo, M. (2004). *Evolução da linha de costa da praia da Vagueira*. Tese de mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, 188 p.
- Dolan, R. & Davis, R. (1992). An intensity scale for atlantic coast northeast storms. *Journal of Coastal Research*, 8(4):840–853.
- Dorsch, W., Newland, T., Tassone, D., Tymons, S., & Walker, D. (2008). A statistical approach to modelling the temporal patterns of ocean storms. *Journal of Coastal Research*, 246:1430–1438.
- Esri (2012). How Interpolate Shape works. Disponível em: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//00q900000038000000> [Consultado em 14 de Abril de 2014].

- EUrosion (2006). *Viver com a erosão costeira na Europa – Sedimentos e espaço para a sustentabilidade*. Luxemburgo: Serviço das Publicações Oficiais das Comunidades Europeias, Luxemburgo, 1ª edição, 40 p.
- Ferreira, O. (1993). *Caracterização dos principais factores condicionantes do balanço sedimentar e da evolução da linha de costa entre Aveiro e o Cabo Mondego*. Tese de mestrado, Universidade de Lisboa, Lisboa, 168 p.
- Ferreira, O. (1998). *Morfodinâmica de praias expostas: aplicação ao sector costeiro Aveiro-Cabo Mondego*. Tese de doutoramento, Universidade do Algarve, Algarve, 337 p.
- Ferreira, O. (2005). Storm groups versus extreme single storms: predicted erosion and management consequences. *Journal of Coastal Research*, SI(42):221–227.
- Ferreira, O. & Dias, J. (1997). Avaliação da acção de temporais na costa oeste portuguesa (sector Aveiro - Cabo Mondego). *Associação EUROCOASTPORTUGAL, Porto*, pp: 429–447.
- Ferreira, O. & Dias, J. A. (1992). Dune erosion and shoreline retreat between Aveiro and Cape Mondego (Portugal). Prediction of future evolution. *Proceedings of the international coastal congress*, pp: 187–200.
- Ferreira, O., Vousdoukas, M., & Ciavola, P. (2009). *Review of climate change impacts on storm occurrence*, Project 20. Micore, pp: 71–78.
- Gama, C., Dias, J., Ferreira, O., & Taborda, R. (1994). Analysis of storm surge in Portugal, between June 1986 and May 1988. *Littoral 94*, pp: 381–387.
- GIZC (2007). *Bases para a Estratégia de Gestão Integrada da Zona Costeira Nacional*. Ministério do Ambiente do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, Lisboa, 1ª edição, 112 p.
- Hurrell, J. & National Center for Atmospheric Research Staff (2014). The Climate Data Guide: Hurrell North Atlantic Oscillation (NAO) Index (station-based). Disponível em: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-station-based> [Consultado em 05 de Setembro de 2014].
- Instituto Hidrográfico - IH (1990). *Roteiro da costa de Portugal*. Instituto Hidrográfico, Lisboa, 2ª edição, 394 p.
- IPMA (2014a). Notícias. Disponível em: <http://www.ipma.pt/pt/media/noticias/newsdetail.html?f=/pt/media/noticias/arquivo/2014/temporal-atlantico-norte-3-6-jan-2014.html> [Consultado em 1 de Novembro de 2014].
- IPMA (2014b). Oscilação do Atlântico Norte. Disponível em: <https://www.ipma.pt/pt/educativa/tempo.clima/index.jsp?page=clima.nao.xml> [Consultado em 20 de Novembro de 2014].

- Jones, P., Jonsson, T., & Wheeler, D. (1997). Extension to the North Atlantic oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and south-west Iceland. *International Journal of Climatology*, 17(13):1433–1450.
- Komar, P. (1976). *Beach Processes and Sedimentation*. Prentice Hall, New Jersey, 4<sup>a</sup> edição, 429 p.
- Komar, P. (1998). *Beach processes and sedimentation*. Prentice Hall, Upper Saddle Rive, New Jersey, 2<sup>a</sup> edição, 544 p.
- Lemm, A., Hegge, B., & Masselink, G. (1999). Offshore wave climate, Perth (Western Australia), 1994–96. *Marine and Freshwater Research*, 50(2):95.
- Li, F., Roncevich, L., Bicknell, C., Lowry, R., & Ilich, K. (2009). Storm Waves and Their Temporal and Directional Distribution, Perth, 1994-2008. *5th Western Australian State - Coastal Conference 2009*, 9 p.
- Limber, P., Patsch, K., & Griggs, G. (2008). Coastal Sediment Budgets and the Littoral Cutoff Diameter: A Grain Size Threshold for Quantifying Active Sediment Inputs. *Journal of Coastal Research*, 2:122–133.
- Lorenzo, M., Ramos, A., Taboada, J., & Gimeno, L. (2011). Changes in present and future circulation types frequency in northwest Iberian Peninsula. *PloS one*, 6(1):e16201.
- Loureiro, E. (2007). *Indicadores geomorfológicos e sedimentalógicos na avaliação da tendência evolutiva da zona costeira : aplicação ao concelho de Esposende*. Tese de doutoramento, Universidade do Minho, Braga, 330 p.
- Maia, A. (2012). *Evolução litoral entre a Vagueira e a Praia de Mira - análise geoeconómica*. Tese de mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, 72 p.
- Marta-Almeida, M. & Dubert, J. (2006). The structure of tides in the Western Iberian region. *Continental Shelf Research*, 26(3):385–400.
- Martins, C. (2011). A laguna de Aveiro (Centro de Portugal ) no século XIX: uma abordagem através da geomorfologia histórica. *Estudos do Quaternário*, 7:61–72.
- NOAA (2014). Sediment Budgets in Coastal Systems. Disponível em: <http://coast.noaa.gov/archived/beachnourishment/html/geo/budgets.htm?redirect=301ocm> [Consultado em 8 de Outubro de 2014].
- Pereira, L. (2000). *Evolução de curto prazo da linha de costa entre Costa Nova e Poço da Cruz*. Tese de mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, 255 p.
- Picado, A., Lopes, C. L., Mendes, R., Vaz, N., & Dias, J. a. M. (2013). Storm surge impact in the hydrodynamics of a tidal lagoon: the case of Ria de Aveiro. *Journal of Coastal Research*, SI(65):796–801.
- Pilar, P., Soares, C., & Carretero, J. (2008). 44-year wave hindcast for the North East Atlantic European coast. *Coastal Engineering*, 55(11):861–871.
- Pinto, J., Mota, P., & Costa, M. (2014). Evolução da climatologia de agitação marítima em Portugal continental. *3.as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, pp: 195–198.

- Pita, C. A. & Santos, J. A. (1989). Análise dos Temporais da Costa Oeste de Portugal Continental (1956 a 1988). *Relatório PO\_WAVES 1/89-A*, 29 p.
- Polis (2008). Operações Integradas de Requalificação e Valorização da Orla Costeira. Disponível em: <http://www.polisriadeaveiro.pt/docs/ResolucaoCM-90-2008-3-06.pdf>.
- POOC (2000). Plano de Ordenamento da Orla Costeira de Ovar-Marinha Grande. Disponível em: [http://www.apambiente.pt/\\_zdata/Politicas/Agua/Ordenamento/POOC/RCM/2.RCM142\\_2000\\_POOC0var-MarinhaGrande.pdf](http://www.apambiente.pt/_zdata/Politicas/Agua/Ordenamento/POOC/RCM/2.RCM142_2000_POOC0var-MarinhaGrande.pdf).
- Quevedo, L., Dias, J., Larrea, N., Alves, A., & Colominas, M. (2011). *Estudos da Evolução da Dinâmica Costeira e Estuarina, de Mobilidade de Navegabilidade na Laguna e de Reforço de Margens pela Recuperação de Diques e Motas com Vista à Prevenção de Riscos. Estudo 1 - Estudos da Evolução e Dinâmica Costeira e Estuarina*. Relatório técnico, SENER, Aveiro, 273 p.
- Rebelo, F. (2007). O Risco de Sedimentação na Laguna de Aveiro: Leitura Actual de um Texto de Amorim Girão (1922). *Territorium*, 14:63–69.
- Rebêlo, L. & Brito, P. (2004). A importância das dunas frontais na avaliação da evolução da linha de costa: o caso da Praia da Manta Rota. *V Encontro de Professores de Geociências do Algarve*, 6 p.
- Reis, E. (2010). *Evolução da linha de costa e defesa das zonas costeiras: análise custo/benefício*. Tese de mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, 75 p.
- Rosati, J. (2005). Concepts in sediment budgets. *Journal of Coastal Research*, 212:307–322.
- Silva, A. N., Taborda, R., Bertin, X., & Dodet, G. (2012). Seasonal to Decadal Variability of Longshore Sand Transport at the Northwest Coast of Portugal. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 138(6):464–472.
- Soares, M. (2008). Implementação de um sistema de previsão da agitação marítima para os portos de Leixões e Sines. *O Sector Marítimo Português*, pp: 397 – 411.
- Taborda, R. & Dias, J. (1992). Análise da Sobrelevação do Nível do Mar de Origem Meteorológica Durante os Temporais de Fevereiro/Março de 1978 e Dezembro de 1981. *Geonovas: A Geologia e o Ambiente*, pp: 89–97.
- Teixeira, S. (1994). *Dinâmica morfossedimentar da Ria de Aveiro (Portugal)*. Tese de doutoramento, Universidade de Lisboa, Lisboa, 393 p.
- Trigo, R., Pozo-Vázquez, D., Osborn, T., Castro-Díez, Y., Gámiz-Fortis, S., & Esteban-Parra, M. (2004). North Atlantic oscillation influence on precipitation, river flow and water resources in the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*, 24(8):925–944.
- Veloso Gomes, F. (2010). Contributos para a revisão do plano de ordenamento da orla csteira na região Centro. *5.as Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente*, 7 p.
- Veloso Gomes, F., Taveira Pinto, F., Neves, L., Pais Barbosa, J., & Coelho, C. (2004). Erosion risk levels at the NW Portuguese coast: The Douro mouth - Cape Mondego stretch. *Journal of Coastal Conservation*, 10(1):43.

- Visbeck, M. (2014). North Atlantic Oscillation. Disponível em: <http://www.ldeo.columbia.edu/res/pi/NAO/> [Consultado em 18 de Novembro de 2014].
- Vitorino, J., Oliveira, A., Jouanneau, J., & Drago, T. (2002). Winter dynamics on the northern Portuguese shelf. Part 1: physical processes. *Progress in Oceanography*, 52(2-4):129–153.
- Wang, X. L., Wan, H., Zwiers, F. W., Swail, V. R., Compo, G. P., Allan, R. J., Vose, R. S., Jourdain, S., & Yin, X. (2011). Trends and low-frequency variability of storminess over western Europe, 1878–2007. *Climate Dynamics*, 37(11-12):2355–2371.
- Warner, J. (2005). Numerical modeling of an estuary: A comprehensive skill assessment. *Journal of Geophysical Research*, 110(C5):C05001.
- Wright, L. & Short, A. (1984). Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Marine Geology*, 56(1-4):93–118.

# Anexos





## Anexo 1

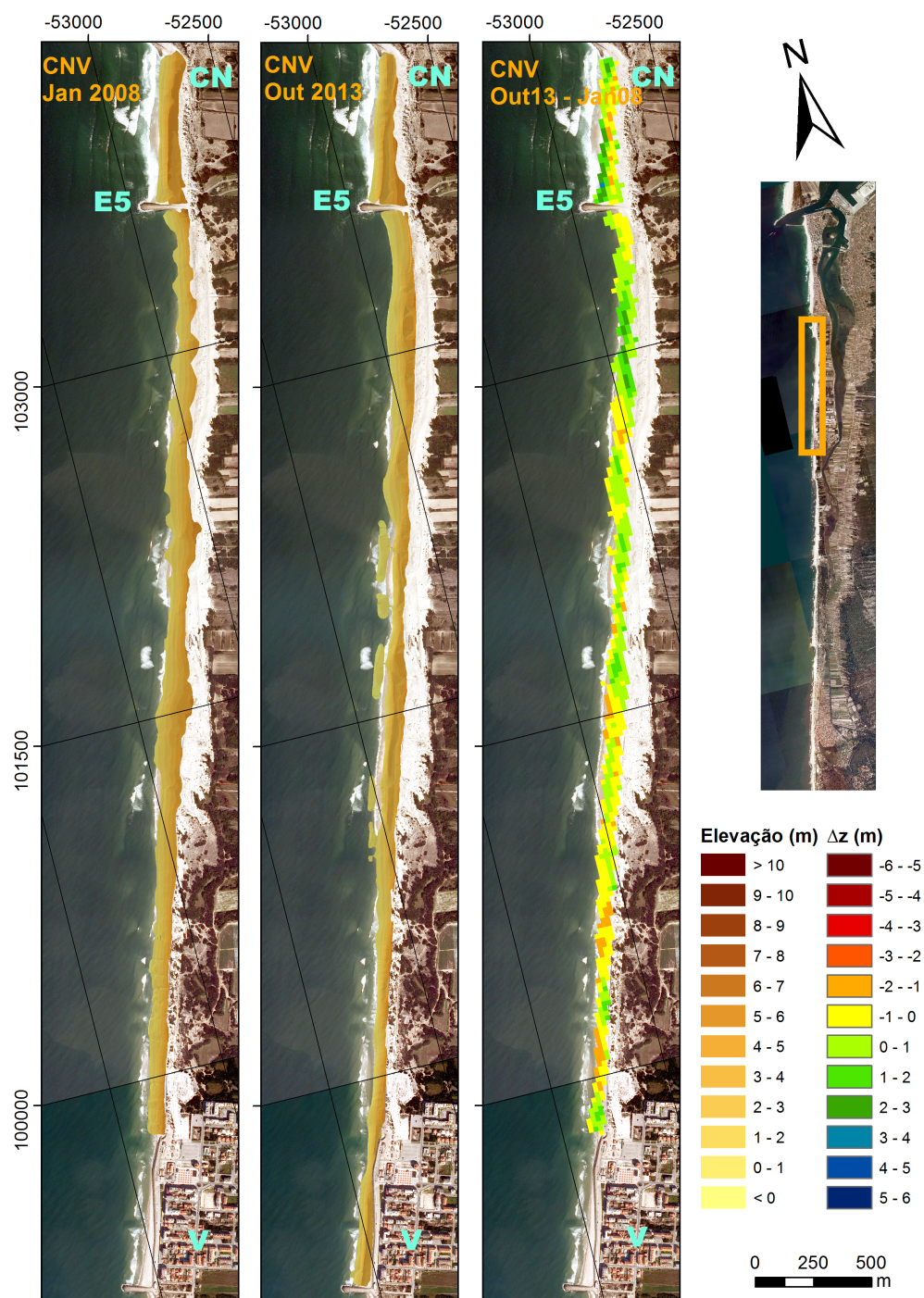


Figura 1: Evolução temporal da geomorfologia no sector CNV para o período Janeiro de 2008 a Outubro de 2013. Para o mapa das diferenças valores superiores a 0 m (verdes e azuis) correspondem a acreção e os valores inferiores a 0 m (amarelos e vermelhos) a erosão. CN - Costa Nova e V - Vagueira correspondem às localidades.

## Anexo 2

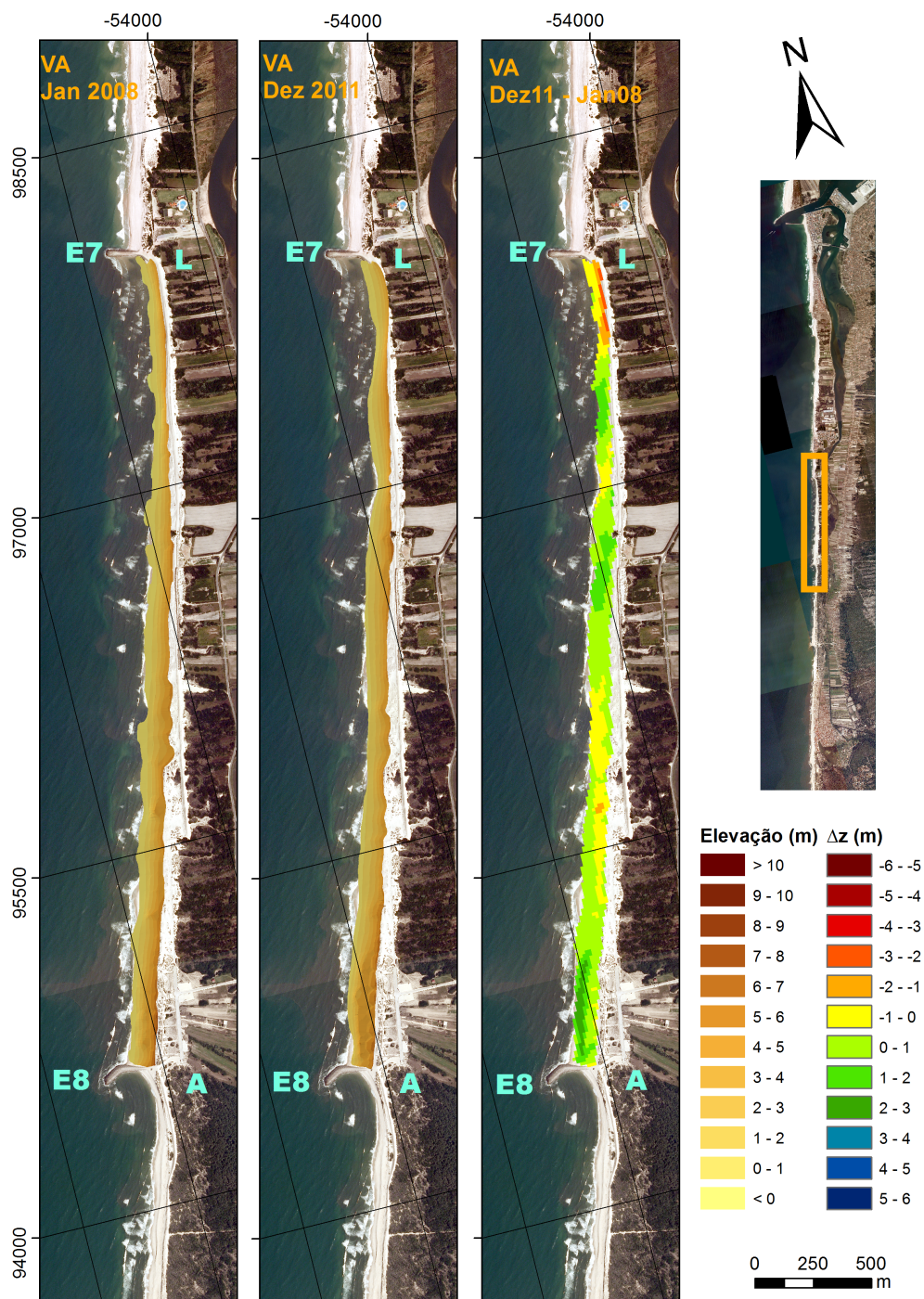


Figura 2: Evolução temporal da geomorfologia no sector VA para o período Janeiro de 2008 a Dezembro de 2011. Para o mapa das diferenças valores superiores a 0 m (verdes e azuis) correspondem a acreção e os valores inferiores a 0 m (amarelos e vermelhos) a erosão. L - Labrego e A - Areão correspondem às localidades.



## Anexo 3

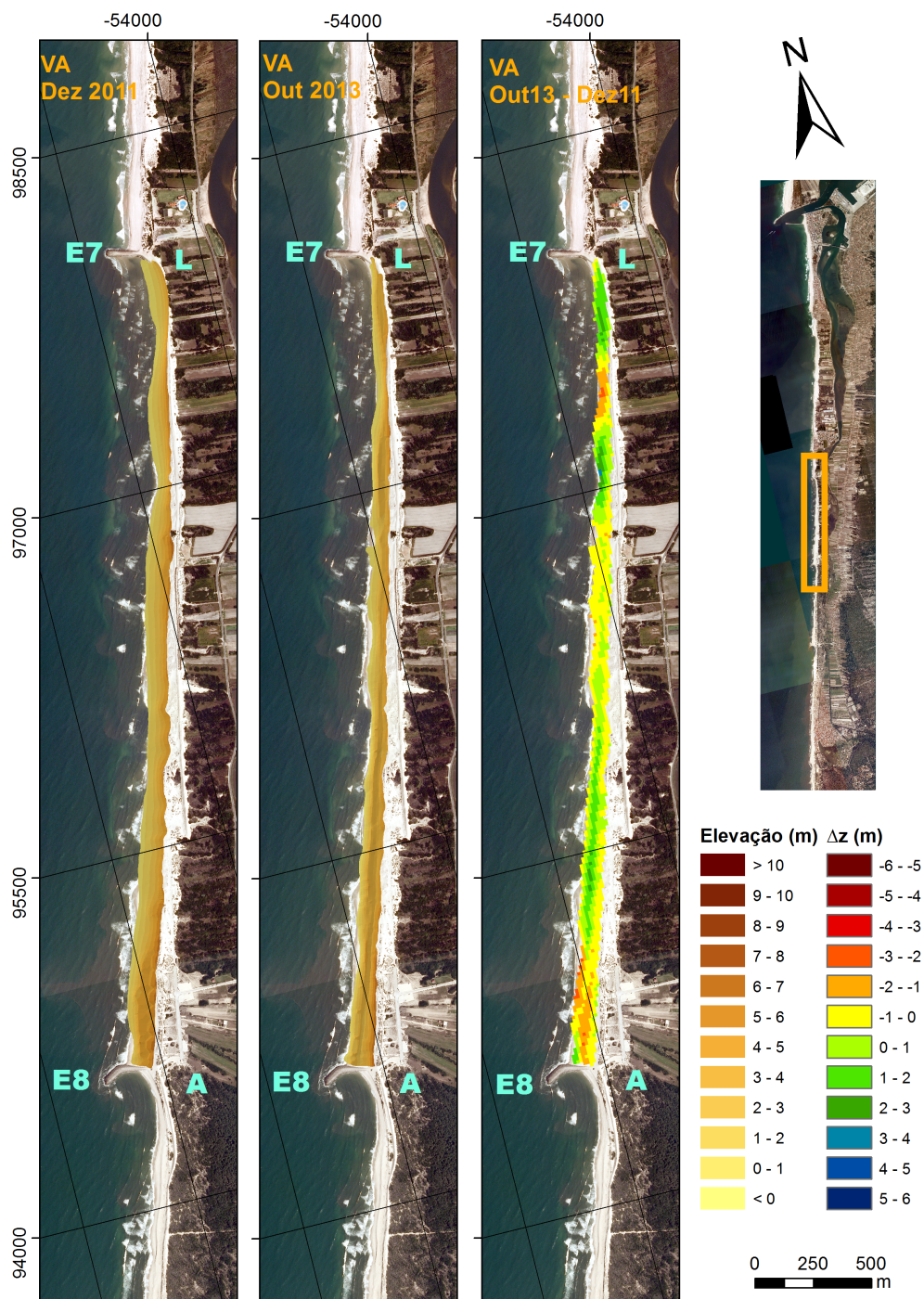


Figura 3: Evolução temporal da geomorfologia no sector VA para o período Dezembro de 2011 a Outubro de 2013. Para o mapa das diferenças valores superiores a 0 m (verdes e azuis) correspondem a acreção e os valores inferiores a 0 m (amarelos e vermelhos) a erosão. L - Labrego e A - Areão correspondem às localidades.

## Anexo 4

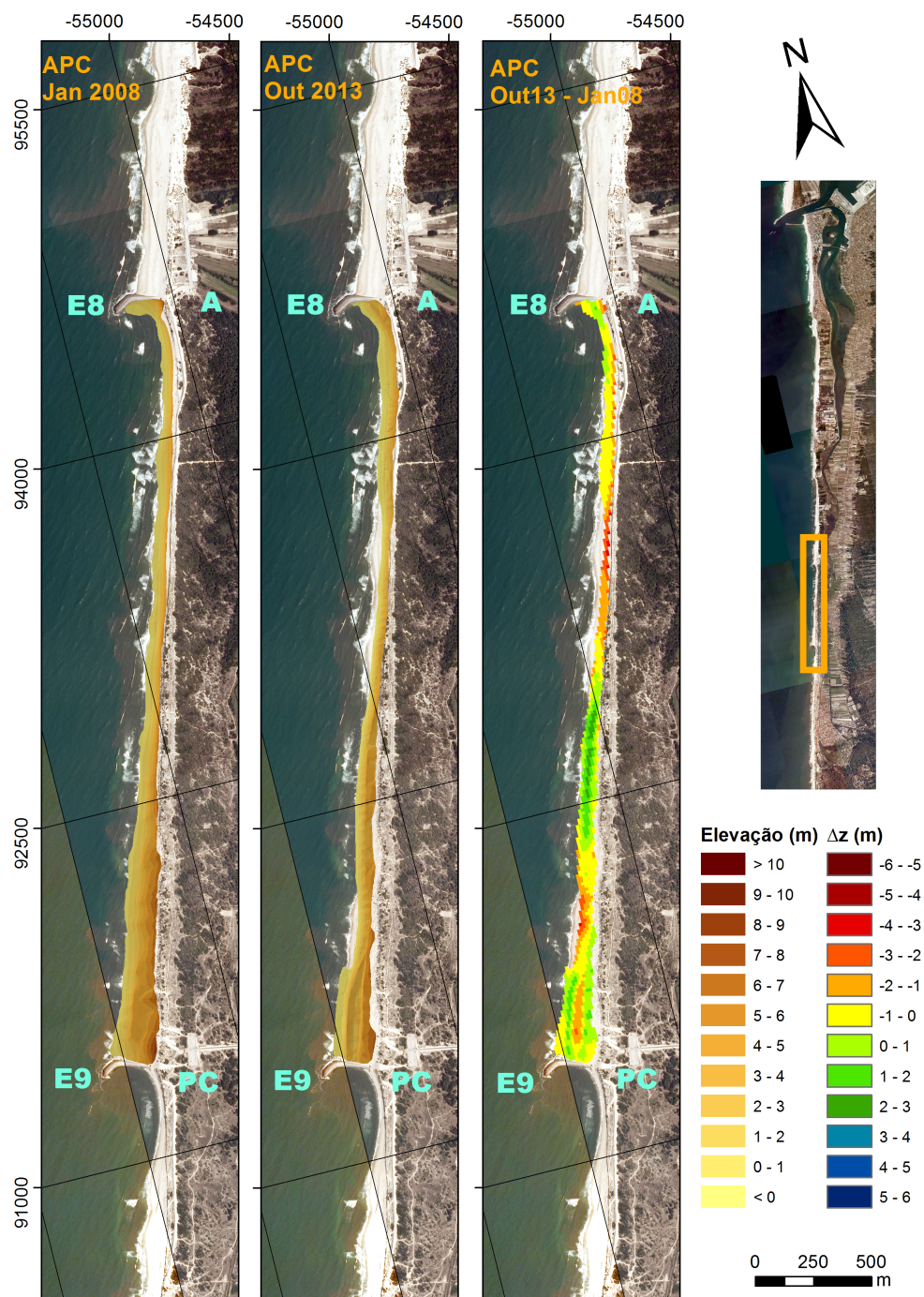


Figura 4: Evolução temporal da geomorfologia no sector APC para o período Janeiro de 2008 a Outubro de 2013. Para o mapa das diferenças valores superiores a 0 m (verdes e azuis) correspondem a acreção e os valores inferiores a 0 m (amarelos e vermelhos) a erosão. A - Areão e PC - Poço da Cruz correspondem às localidades.



## Anexo 5

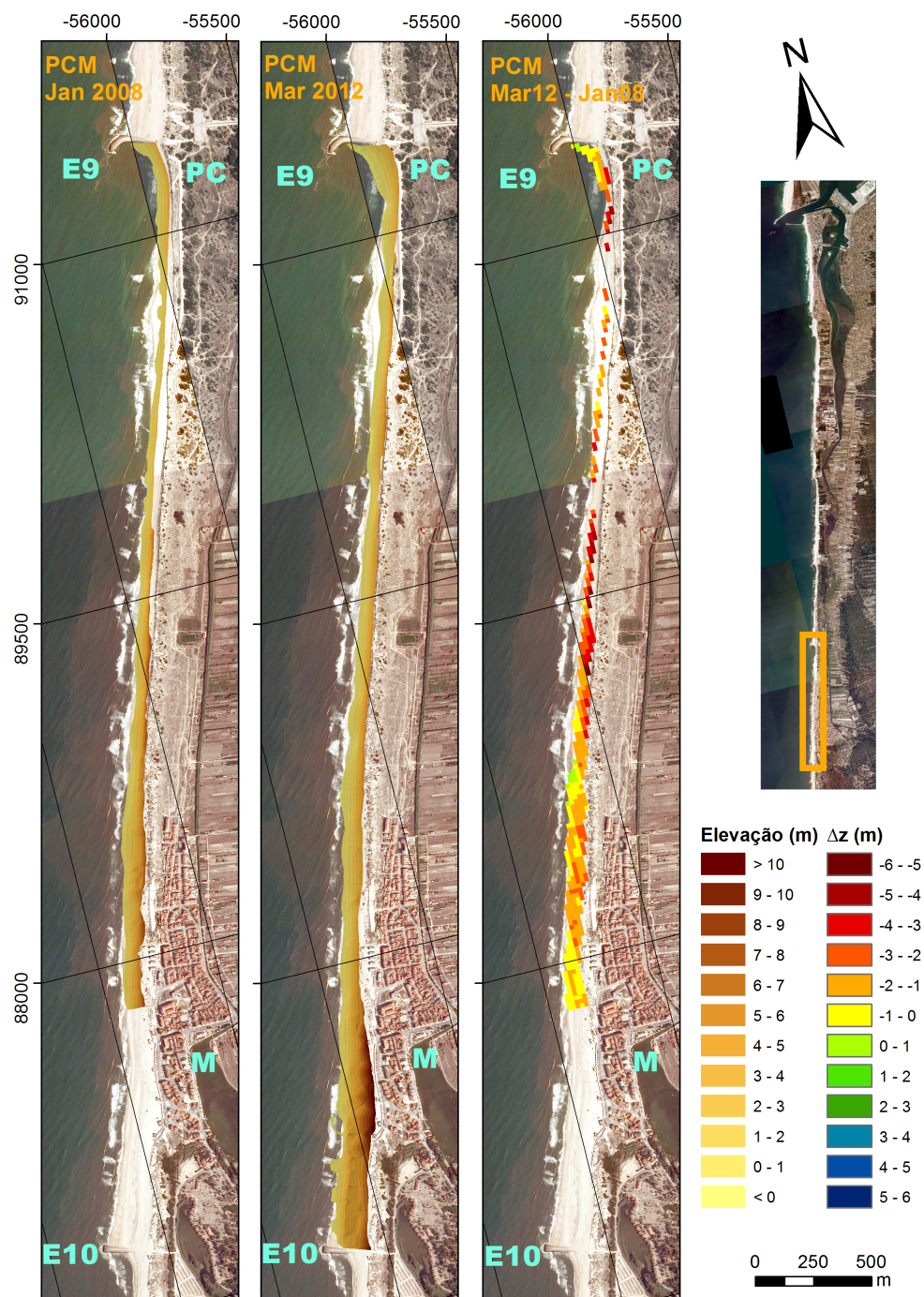


Figura 5: Evolução temporal da geomorfologia no sector PCM para o período Janeiro de 2008 a Março de 2012. Para o mapa das diferenças valores superiores a 0 m (verdes e azuis) correspondem a acreção e os valores inferiores a 0 m (amarelos e vermelhos) a erosão. PC - Poço da Cruz e M - Praia de Mira correspondem às localidades.



## Anexo 6

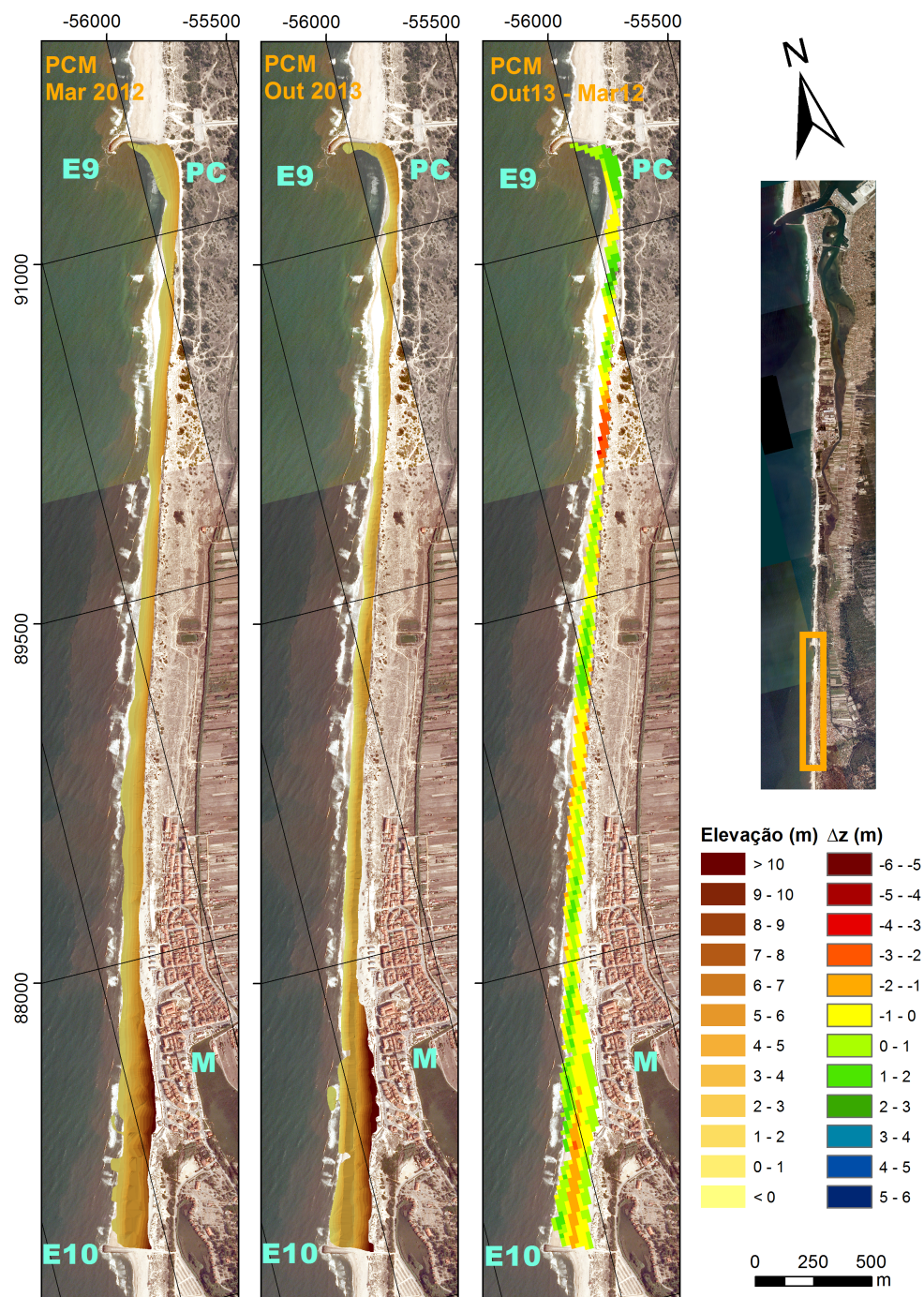


Figura 6: Evolução temporal da geomorfologia no sector PCM para o período Março de 2012 a Outubro de 2013. Para o mapa das diferenças valores superiores a 0 m (verdes e azuis) correspondem a acreção e os valores inferiores a 0 m (amarelos e vermelhos) a erosão. PC - Poço da Cruz e M - Praia de Mira correspondem às localidades.



## Anexo 7

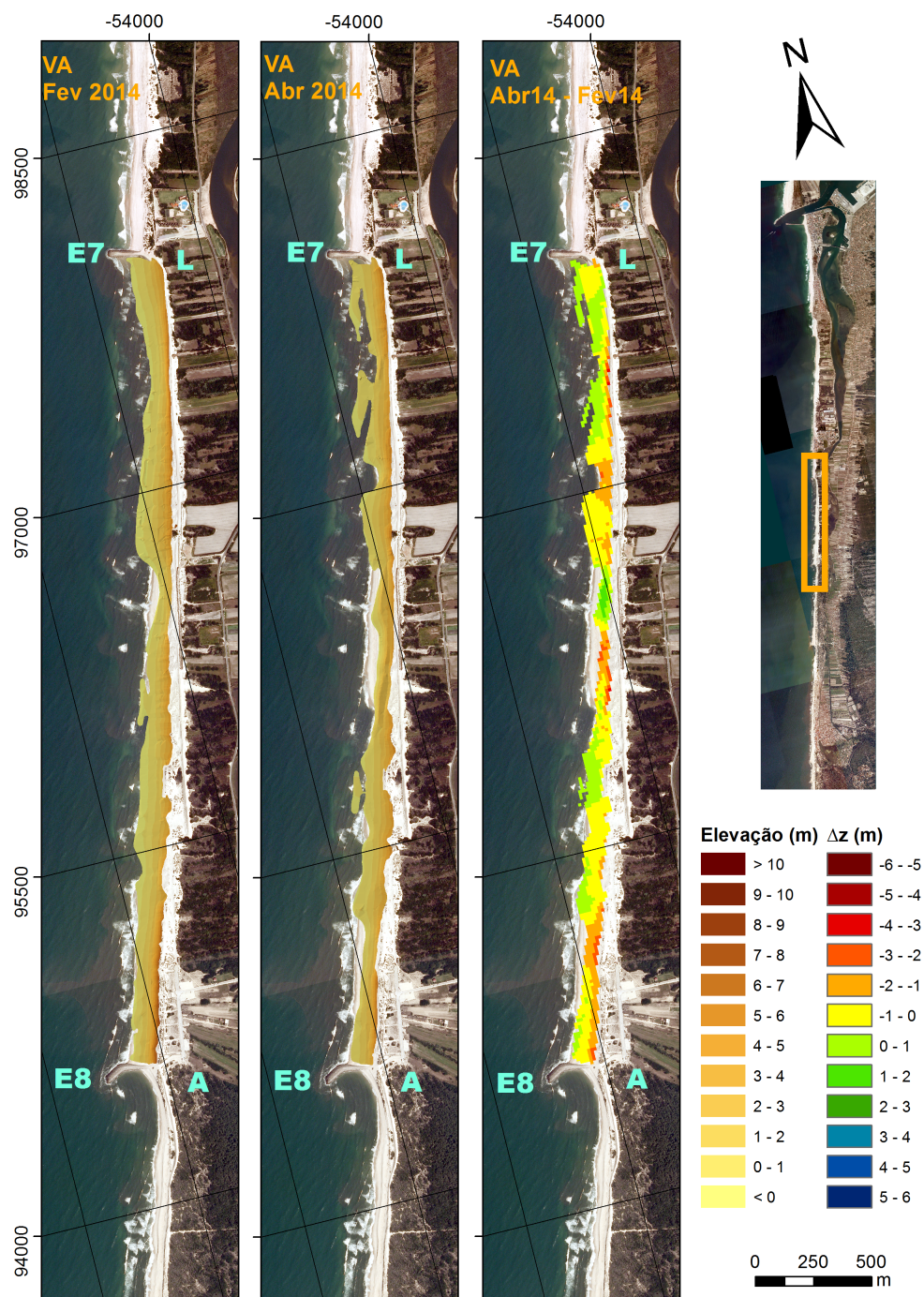


Figura 7: Evolução temporal da geomorfologia no sector VA para o período Fevereiro a Abril de 2014. Para o mapa das diferenças valores superiores a 0 m (verdes e azuis) correspondem a acreção e os valores inferiores a 0 m (amarelos e vermelhos) a erosão. L - Labrego e A - Areão correspondem às localidades.

## Anexo 8

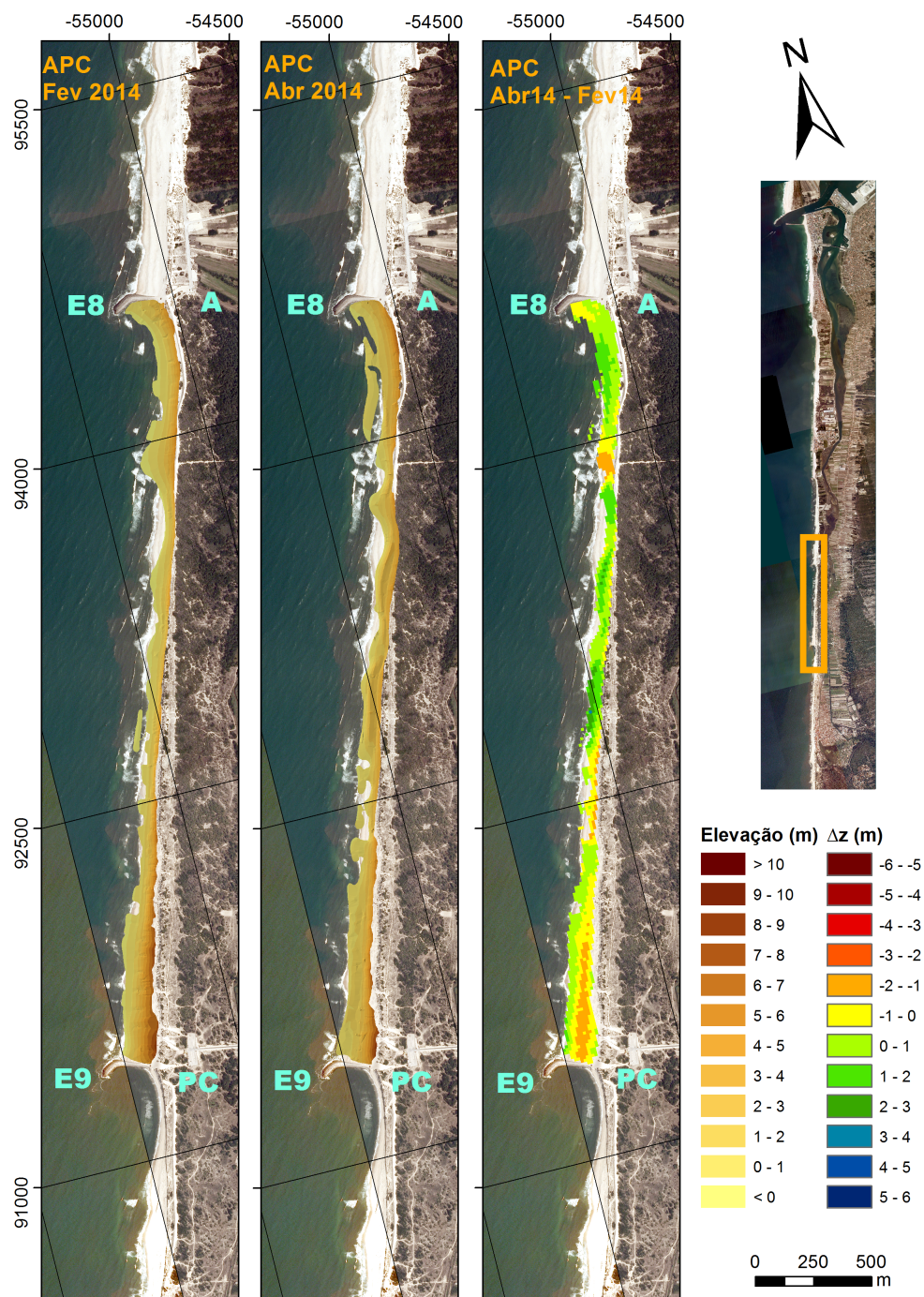


Figura 8: Evolução temporal da geomorfologia no sector APC para o período Fevereiro a Abril de 2014. Para o mapa das diferenças valores superiores a 0 m (verdes e azuis) correspondem a acreção e os valores inferiores a 0 m (amarelos e vermelhos) a erosão. A - Areão e PC - Poço da Cruz correspondem às localidades.



## Anexo 9

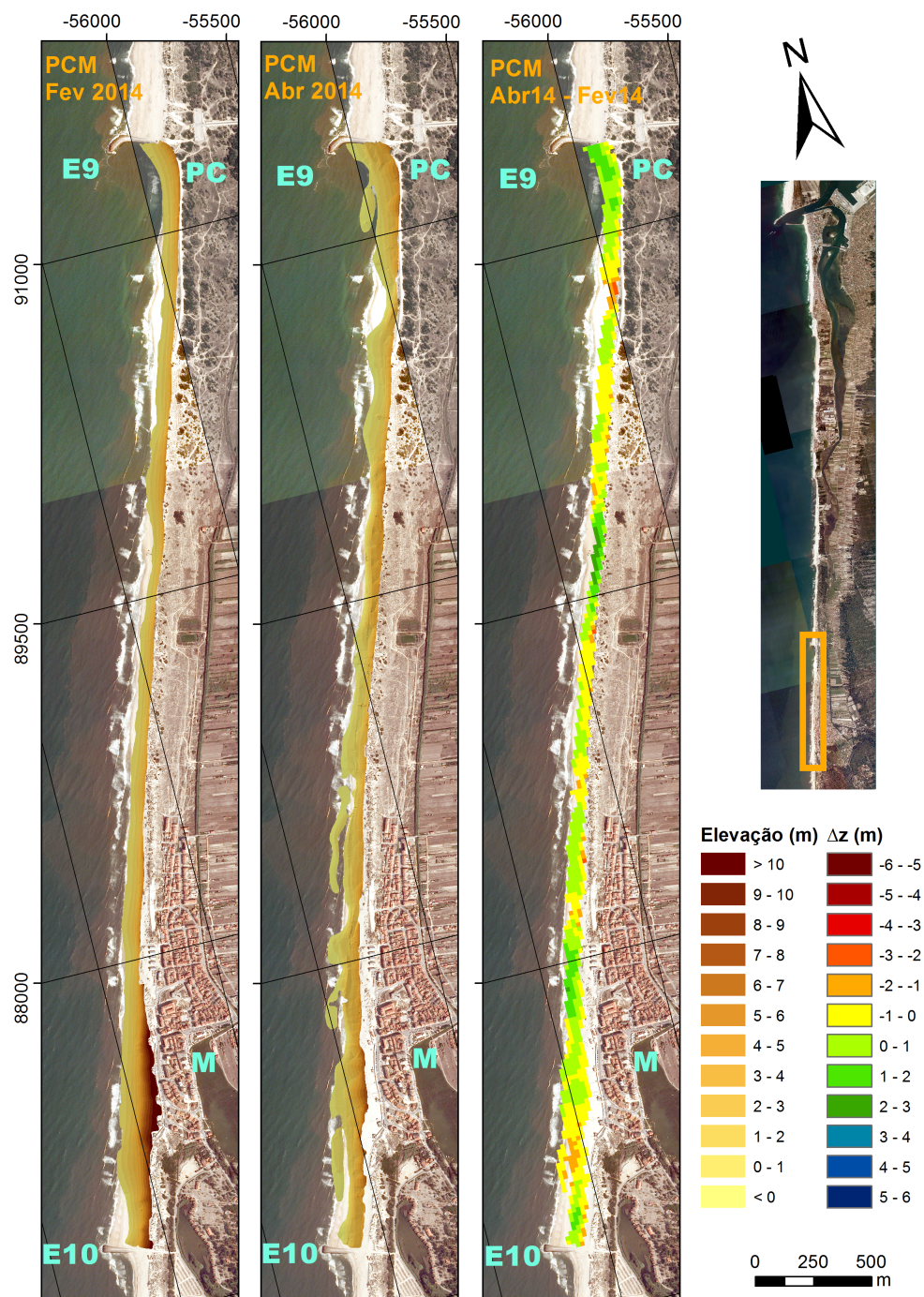


Figura 9: Evolução temporal da geomorfologia no sector PCM para o período Fevereiro a Abril de 2014. Para o mapa das diferenças valores superiores a 0 m (verdes e azuis) correspondem a acreção e os valores inferiores a 0 m (amarelos e vermelhos) a erosão. PC - Poço da Cruz e M - Praia de Mira correspondem às localidades.